

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"
FACOLTA' DI INGEGNERIA



CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN
TRASPORTI

XIX CICLO

METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI
MISURA

Candidata
Ing. Blandina De Iorio

Tutor
Prof. Ing. Luigi Battistelli

Coordinatore
Prof. Ing. Vincenzo Torrieri

Novembre, 2006
Napoli, Italia

Indice

Introduzione.....	1
--------------------------	----------

CAPITOLO 1: Strumenti di misura

1.1	Generalità.....	5
1.2	Caratteristica di funzionamento.....	6
1.3	Sensori.....	9
1.3.1	Classificazione dei sensori.....	10
1.4	Trasduttori.....	11
1.4.1	Parametri caratteristici.....	13
1.4.2	Condizionamento del segnale di uscita.....	15
1.4.3	Estensimetri.....	16
1.4.3.1	Variazioni di resistenza indotte da deformazione.....	19
1.4.3.2	Fattore di gage.....	20
1.4.3.3	Influenza della temperatura.....	20
1.5	Celle di carico.....	23
1.5.1	Struttura di una cella di carico.....	24
1.5.2	Tipologie di celle di carico in commercio.....	26
1.5.2.1	Celle sottoposte a carico flettente.....	28
1.5.2.2	Celle di carico sottoposte a taglio.....	28
1.5.2.3	Celle di carico a compressione.....	30
1.5.2.4	Celle di carico a torsione ad anello.....	31
1.5.3	Fattori legati alla scelta delle celle di carico.....	33
1.5.3.1	Numero di celle di carico.....	33
1.5.3.2	Capacità e accuratezza della cella di carico.....	33
1.6	Voltmetri e multimetri digitali (DVM e DMM).....	36

1.6.1	Schema di un multimetro.....	37
1.6.2	Misure di tensioni continue ed alternate.....	38
1.6.3	Misure di correnti continue ed alternate.....	39
1.6.4	Misurazione di resistenze.....	39
1.6.5	La risoluzione negli strumenti digitali.....	40
1.6.6	Valutazione dell'accuratezza della misura fornita da un multimetro digitale.....	41
1.7	Amplificatori.....	43
1.7.1	Un caso particolare: inseguitore di tensione o buffer a guadagno unitario.....	46
1.7.2	Parametri dell'amplificatore operazionale reale.....	47
1.7.3	Prestazioni.....	50
1.7.4	Dati caratteristici.....	52

CAPITOLO 2: Taratura degli strumenti di misura

2.1	Generalità.....	55
2.2	Definizioni.....	57
2.3	Scelta delle masse e classe di precisione.....	65
2.4	Taratura e riferibilità.....	66
2.5	Campioni di misurazione.....	67
2.6	Procedure di taratura degli strumenti di misura.....	68
2.7	La taratura dei dispositivi di misura delle forze.....	68
2.8	Standards e tracciabilità.....	69
2.9	Taratura dinamica e multi-assiale.....	70
2.10	Varie opzioni per valutare l'incertezza di un sistema di misurazione di una forza.....	70
2.11	La taratura delle celle di carico.....	72
2.11.1	I principi fondamentali.....	72
2.11.2	la distribuzione delle forze di calibrazione.....	73
2.11.3	La procedura di taratura in dettaglio.....	74

2.11.4 Considerazioni sulla parte elettrica delle celle di carico.....	74
2.11.5 Il comportamento a fatica delle celle di carico.....	76
2.11.5.1 Modalità di rottura a fatica delle celle di carico	77
2.11.6 Risoluzione delle celle di carico.....	80
2.11.7 Tensione di eccitazione.....	81
2.11.8 Compensazione del momento.....	82
2.11.9 Compensazione dello zero di temperatura.....	83
2.12 Taratura a pesi morti.....	84
2.12.1 Orientamento del fissaggio.....	85
2.12.2 Orientamento del sensore e dei cavi.....	86
2.12.3 Numerazione dei carichi.....	87
2.12.4 Gioco asta-peso.....	88
2.12.5 Pre condizionamento del sensore e dei fissaggi dopo il monitoraggio.....	89
2.12.6 Applicazione e rimozione del carico in maniera monotona.....	90
2.13 Campioni primari e tracciabilità dei dati.....	90
2.14 Analisi dei dati.....	91
2.14.1 L'incertezza per particolari dispositivi di forza.....	94

CAPITOLO 3: Misura e incertezza

3.1 Generalità.....	95
3.2 Classificazione dei metodi di misurazione.....	95
3.2.1 Metodi di misurazione diretti.....	96
3.2.2 Metodi di misurazione indiretti.....	98
3.3 Diagramma di produzione di una misura	99
3.4 La stima dell'incertezza di misura.....	102
3.4.1 Valutazione dell'incertezza tipo delle stime d'ingresso secondo la Guida all'Incertezza di Misura (GUM).....	103

3.4.2	Incertezza tipo di categoria A.....	103
3.4.3	Incertezza tipo di categoria B.....	104
3.4.4	Calcolo dell'incertezza tipo della stima d'uscita.....	105
3.4.5	Incertezza tipo composta.....	106
3.4.6	Determinazione dell'incertezza estesa.....	108
3.5	Il Supplemento 1 alla GUM.....	111
3.6	La Trasformata Unscented.....	112
3.7	Regole di scrittura.....	113

CAPITOLO 4: Metodo di integrazione diretta per il calcolo dell'incertezza e applicazioni

4.1	Generalità.....	114
4.2	I metodi attualmente utilizzati.....	114
4.3	Metodo di Integrazione Diretta.....	116
4.4	Metodi numerici utilizzati per il calcolo degli integrali.....	117
4.4.1	Casi di confronto.....	118
4.5	Tempi macchina del metodo di Integrazione Diretta.....	123
4.6	Proposta di studio.....	124
4.6.1	Descrizione del tappetino.....	124
4.6.2	Descrizione dell'attrezzatura di prova.....	125
4.6.3	Metodologie di calcolo dell'incertezza delle misure di rigidità del tappetino.....	127
4.6.3.1	Un metodo per la determinazione della funzione di trasferimento: Regressione Simbolica per Codifica Lineare.....	128
4.6.3.2	Esempi di applicazione di Regressione Simbolica per Codifica Lineare.....	128
4.6.4	La valutazione dell'incertezza di misura.....	130
Conclusioni.....		132

Appendice

Bibliografia

CAPITOLO 1

STRUMENTI DI MISURA**1.1 Generalità**

L'energia gioca un ruolo fondamentale in tutti i processi naturali nei quali, com'è noto, assume diverse forme (elettrica, meccanica, termica, chimica, elettromagnetica, ecc.). Anche il funzionamento di qualsiasi sistema o impianto tecnologico progettato dall'uomo è regolato da scambi energetici tra diverse parti o sottosistemi, nonostante tale concetto sfugga spesso all'osservatore. Affinché ciò possa avvenire, è spesso necessario convertire l'energia, dalla forma nella quale essa risulta presente in un certo contesto, ad un'altra più comoda per specifiche funzioni.

Limitandosi al settore impiantistico, si pensi ad esempio al controllo del flusso luminoso emesso da assegnate sorgenti (controllo che può andare dal semplice on/off notturno/diurno ad una più fine regolazione in funzione della luminosità ambientale), oppure alla regolazione della temperatura di una stanza in funzione della temperatura esterna o di una soglia stabilita dall'utente. In questi due specifici casi è necessario disporre di un dispositivo in grado di convertire parte dell'energia associata al flusso luminoso (energia elettromagnetica) o alla temperatura (energia termica) in un segnale elettrico ad essa proporzionale.

I trasduttori sono dispositivi in grado di assolvere a tale compito. Essi convertono (trasducono) energia da una forma primaria ad un'altra più comoda per un assegnato contesto. In tal senso, i segnali elettrici sono quelli più comunemente utilizzati, per la grande facilità di elaborazione possibile su di essi. Trasduttori ed energia formano quindi un binomio concettualmente inscindibile.

Esistono trasduttori specificatamente concepiti per trasformare, con precisione più o meno spinta, il valore istantaneo della grandezza fisica d'ingresso nel valore proporzionale di un segnale elettrico (in tensione o in corrente). Se la prima grandezza varia nel tempo anche il segnale varierà con legge proporzionale. Trasduttori che operano nella maniera descritta sono detti sensori di misura.

Ogni apparecchio di misura è caratterizzato da alcune qualità, fra le quali hanno massima importanza la sensibilità, la precisione, la prontezza, la fedeltà, la stabilità; ciascuna di queste qualità può assumere diverso interesse a seconda della misura cui l'apparecchio è destinato, e può anche essere in varia misura modificata dal metodo di impiego dell'apparecchio. Le caratteristiche funzionali e metrologiche degli strumenti di misura sono quelle grandezze che permettono di stabilire delle interrelazioni significative tra le letture effettuate dallo strumento e i valori del misurando. Esse, di solito riportate sinteticamente nei cataloghi degli

strumenti di misura, permettono la completa caratterizzazione del comportamento dello strumento stesso.

1.2 Caratteristica di funzionamento

La caratteristica di funzionamento (o relazione di taratura statica o funzione di taratura) è la relazione che lega tra loro i valori della grandezza in uscita dallo strumento a quelli in ingresso, stabilendo una corrispondenza tra i valori di lettura dello strumento ed i risultati della misurazione, quando il sensore funziona in regime stazionario.

La corrispondenza tra valori di uscita dallo strumento e misurando non può essere biunivoca, in quanto lo strumento stesso è rappresentabile solo in prima approssimazione da un sistema in ingresso e uno in uscita. La caratteristica di funzionamento è, quindi, la relazione che associa ad ogni valore della grandezza in uscita una corrispondente fascia di valori del misurando. Nella pratica si è soliti fornire in maniera separata:

- la curva di taratura (*calibration curve*), che è la relazione biunivoca tra ogni valore di uscita ed il corrispondente valore del punto centrale della fascia di valori del misurando.
- l'incertezza di taratura (*calibration uncertainty*), che è l'ampiezza della fascia di valori, di solito riportata in valore assoluto o relativo (in quest'ultimo caso l'incertezza relativa è riferita al valore medio della fascia di valori).

La curva caratteristica può essere determinata a priori, “caratteristica ideale”, o a posteriori, per taratura, “caratteristica reale”. Le due curve, ideale e reale, di solito si discostano l'una dall'altra a causa delle imperfezioni dello strumento o degli effetti dissipativi, quali attriti o capacità elettriche interne dello strumento. Analogamente, si discostano tra loro la curva “caratteristica nominale”, cioè quella dichiarata dal costruttore (di solito linearizzata), e la curva “caratteristica reale” che, come detto, si ottiene per taratura dello strumento.

La taratura statica di uno strumento esige la perfetta costanza di tutte le grandezze interagenti, fuorchè quella di misura; queste grandezze vengono fatte variare facendo assumere ad esse valori predeterminati e fissi, in corrispondenza dei quali si leggono i valori di uscita dello strumento.

L'operazione di taratura presuppone:

- la perfetta conoscenza della strumentazione e dell'ambiente di misura per determinare tutte le possibili cause di influenza con la conseguente valutazione dei loro “pesi relativi”;
- la disponibilità di mezzi e strumenti per il controllo e la misura di tali grandezze di influenza;

- una serie di misure con differenti valori delle grandezze di influenza, variate a gruppi.

Una relazione di taratura statica vale: - per un assegnato campo di impiego; - per definite condizioni ambientali; - con un limite di validità temporale delle curve caratteristiche (stabilità).

La strumentazione è di norma soggetta, durante la sua vita, a periodiche verifiche di taratura. Tali verifiche sono spesso integrate da operazioni di calibrazione, consistenti in aggiustaggi in scala ottenuti simulando in ingresso un misurando di entità nota.

Poiché l'operazione di taratura, cioè il confronto tra i valori letti dallo strumento (L) e quelli del campione (Q), avviene di solito per un numero discreto di valori del misurando, la taratura di uno strumento viene fornita tramite il cosiddetto coefficiente di taratura, C, definito come:

$$C = \frac{Q}{L} = \frac{\text{Valore del campione}}{\text{Valore in uscita dallo strumento}} \quad (26)$$

Ad ogni valore di L corrisponde, quindi, un valor medio del coefficiente di taratura, C. Pertanto il valore esatto della misura si ottiene moltiplicando il valore letto L per il coefficiente di taratura C.

Una volta note le curve caratteristiche di funzionamento, è possibile definire sia il tempo di misura che la sensibilità dello strumento.

Il campo di misura è l'intervallo dei valori del misurando che possono essere rilevati dallo strumento ("range"). Il limite superiore di tale campo viene invece definito "portata", o, in inglese, "*full scale*" (FS) o, a volte, "*full scale output*" (FSO). Il termine "*span*" rappresenta invece il rapporto tra i valori estremi del campo di misura (ad es. 10:1, 100:1, etc). Si noti che tale rapporto talvolta viene riportato sotto il nome di "*rangeability*".

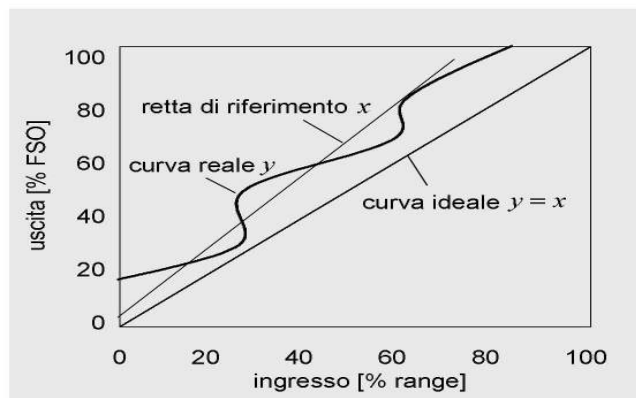


Fig. 1.1 - Rappresentazione delle curve reale e ideale per un sensore

La sensibilità statica (*sensitivity*) è il rapporto tra la variazione della grandezza in uscita e quella in ingresso $S = \frac{\Delta U}{\Delta I}$, rapporto che, se la curva caratteristica è derivabile, diventa $S = \frac{du}{di}$.

La condizione migliore è ovviamente quella a sensibilità costante, cioè di curva caratteristica lineare; se ciò non avviene bisogna definire la sensibilità in ogni punto del campo di misura. Da notare che il concetto di sensibilità ha insito un concetto di amplificazione che coincide con quest'ultimo solo quando le due grandezze in ingresso e uscita hanno le stesse dimensioni.

La “soglia di sensibilità” (o “*resolution*”) è la più piccola variazione della grandezza di misura capace di provocare una risposta percettibile, anche se non quantizzabile, dello strumento. Questa non va confusa con la “leggibilità” che è, invece, la più piccola variazione apprezzabile sull'asse delle letture o, nel caso di strumenti a lettura digitale, con la cosiddetta “risoluzione”, che è la quantità corrispondente alla variazione unitaria della cifra meno significativa (ultimo “*digit*”).

A tali grandezze caratteristiche del comportamento statico di uno strumento di misura vanno aggiunte quelle di ripetibilità, accuratezza e precisione che permettono la completa definizione metrologica dello strumento stesso.

La ripetibilità (*repeatability*) è quella caratteristica metrologica che definisce la capacità di uno strumento di misura a dare indicazioni concordi in risposta a condizioni di ingresso (condizioni di misura) costanti e consecutive.

Un concetto analogo a quello di ripetibilità è quello di stabilità (*stability*). La differenza tra i due è che quest'ultimo estende nel tempo l'attitudine dello strumento a fornire risultati poco dispersi nelle medesime condizioni di misura.

L'accuratezza (*precision*) è, invece, un concetto legato alla presenza di più incertezze sistematiche dello strumento di misura. Essa è definibile come differenza in valore e segno tra il valore ritenuto vero e la media di una serie di misure.

Uno strumento è tanto più accurato quanto più la media di una serie di misure da esso effettuate è vicina al valore ritenuto vero, cioè al valore ottenuto come media di una serie di misure effettuate con uno strumento campione.

La precisione (*accuracy*) è, infine, una caratteristica metrologica globale che sintetizza i due concetti di ripetibilità ed accuratezza espressi in precedenza. Essa è infatti l'attitudine dello strumento a fornire una misura con la minima incertezza rispetto al valore dell'incertezza assoluta possibile ad un certo livello di probabilità. In termini di formula, l'espressione della accuratezza è del tipo:

$$accuracy = \pm [\text{Valore misurato} \cdot a_r + \text{Fondo scala} \cdot a_f + \text{Risoluzione} \cdot a_d],$$

in cui a_r è l'errore percentuale sul valore misurato, a_f quello sul fondo scala e a_d quello sulla risoluzione.

1.3 Sensori

Gli strumenti di misura che più interessano nella presente trattazione possono essere classificati in due grandi famiglie: quella dei sensori e quella dei trasduttori. Viene definito “*sensore*” un componente che trasforma una grandezza fisica in elettrica e “*trasduttore*” un componente che trasforma una grandezza elettrica in fisica. I sensori vengono, a loro volta, classificati in due categorie:

- ◇ Classificazione per sensibilità ad una specifica grandezza chimico-fisica (es. sensori di pressione, di temperatura, etc.).
- ◇ Classificazione per natura, indipendente dall'impiego (es. sensori resistivi, capacitivi, etc.).



Fig. 1.2 - Esempio di sensori di pressione

Le caratteristiche di interesse dei sensori sono:

- principio operativo;
- tipo e caratteristiche dell'alimentazione esterna;
- tipo di uscita (segnale di corrente, di tensione, etc);
- riproducibilità di comportamento (valori di uscita) in diverse condizioni operative;
- stabilità;
- affidabilità;
- resistenza a condizioni di sovraccarico;
- sensibilità e risoluzione;
- range operativo.

In particolare, per i sensori, i parametri di interesse sono i seguenti:

- ✓ Precisione: indica la ripetibilità di una misura. Una misura è tanto più precisa quanto minore è la dispersione delle successive repliche della misura stessa intorno al loro valore medio.
- ✓ Accuratezza: è lo scostamento tra il valore misurato e il valore vero.
- ✓ Risoluzione: è il minimo segnale di ingresso che può essere rilevato con sicurezza all'uscita dello strumento.
- ✓ Sensibilità: è il rapporto tra la variazione della grandezza di uscita e la variazione della grandezza in ingresso che l'ha provocata.
- ✓ Stabilità: la proprietà che esprime di quanto varia nel tempo una prestazione caratteristica dello strumento.
- ✓ Linearità: definisce la costanza, su tutta la scala dello strumento, del rapporto fra la grandezza di uscita e di ingresso, al variare di quest'ultima.
- ✓ Prontezza: intervallo di tempo impiegato dallo strumento per fornire in uscita il valore della grandezza misurata, entro i suoi limiti di accuratezza.
- ✓ Coefficiente di temperatura: la variazione relativa della grandezza di uscita, ad ingresso costante, al variare di un grado della temperatura. Generalmente viene fornito in valore percentuale, specificando l'intervallo entro il quale tale coefficiente si applica.
- ✓ Dinamica: è la massima estensione del campo di misura dello strumento. Spesso viene indicata mediante il rapporto, in dB, tra la massima e la minima grandezza misurata.

1.3.1 Classificazione dei sensori

Un criterio unico utilizzabile per la classificazione di tutti i sensori non esiste, essendone l'utilità strettamente dipendente dal contesto di utilizzo. Macroscopicamente, i sensori che forniscono come grandezza di uscita una tensione o una corrente elettrica, possono essere classificati sulla base della grandezza d'ingresso: si parla in tal senso di sensori di temperatura, di luminosità, etc.. Tuttavia ogni specifica categoria prevede differenti tipologie: alcuni sensori potrebbero essere utilmente classificati sulla base della propria caratteristica fisica che varia conseguentemente a variazioni della grandezza d'ingresso (sensori resistivi, induttivi, capacitivi, etc.), altri sulla base del principio fisico che ne governa il funzionamento (sensori piezoelettrici, elettromagnetici, ad effetto di Hall, ecc.), altri ancora basandosi su considerazioni energetiche. In quest'ultimo caso si usa distinguere tra sensori attivi e passivi a seconda che l'energia associata al segnale in uscita sia ivi fornita a spese del segnale di ingresso oppure di una fonte di alimentazione esterna

I fattori che influenzano la scelta tra i vari tipi di sensori sono:

- ◆ Nonlinearità.
- ◆ Isteresi.
- ◆ Effetti termici.
- ◆ Calibrazione.
- ◆ Effetti di carico.
- ◆ Dimensioni fisiche dei componenti.
- ◆ Banda di errore ($\pm \varepsilon \%$).
- ◆ Tempo di risposta.

1.4 Trasduttori

In generale, il trasduttore è un dispositivo in grado di trasformare le variazioni di una grandezza fisica, normalmente non elettrica, in un'altra grandezza, normalmente di natura elettrica (tensione, frequenza o corrente).

Nel presente contesto, con la parola trasduttore si intenderà sempre un trasduttore "di ingresso", che viene cioè normalmente stimolato da una assegnata variabile fisica (forza, pressione, temperatura, intensità luminosa, ecc.) e produce un corrispondente segnale elettrico destinato a costituire l'ingresso di un sistema di misura e controllo.

Concettualmente, i cosiddetti "trasduttori d'uscita" sono invece quelli che effettuano la conversione inversa, trasformando l'energia associata al segnale elettrico, costituente l'uscita di un sistema, in un'altra forma più utile: ciò avviene ad esempio nel caso degli altoparlanti o degli strumenti indicatori a bobina mobile che operano una trasformazione di energia elettrica in energia meccanica.



Fig. 1.3 - Vari tipi di trasduttori

Tutti i sensori posseggono almeno due porte energetiche: una di ingresso, dalla quale transita l'energia associata alla grandezza fisica rilevata dal sensore

(grandezza d'ingresso), e una di uscita, dalla quale transita l'energia associata al segnale nel quale la grandezza d'ingresso è stata convertita.

La grandezza d'ingresso definisce il campo di applicazione del sensore (per misure di temperatura, di luminosità, ecc.).

Nei sensori di tipo passivo l'energia disponibile sul segnale in uscita dipende pesantemente dall'energia associata al fenomeno fisico di ingresso e dall'efficienza di conversione del sensore. Non vi sono molti gradi di libertà da questo punto di vista: ad esempio nell'impiego delle termocoppie, si è vincolati ad una bassa sensibilità, ad un basso livello di uscita e ad una risposta non lineare. Sebbene sia possibile scegliere differenti combinazioni di metalli per ottenere, ad esempio, differenti range di temperatura, non è fisicamente possibile migliorare le caratteristiche di conversione di una assegnata termocoppia.

Grazie alla disponibilità di una sorgente di alimentazione esterna, con i sensori attivi è invece possibile ottenere migliori prestazioni mediante una oculata scelta, in sede di progetto, del sistema di lettura.

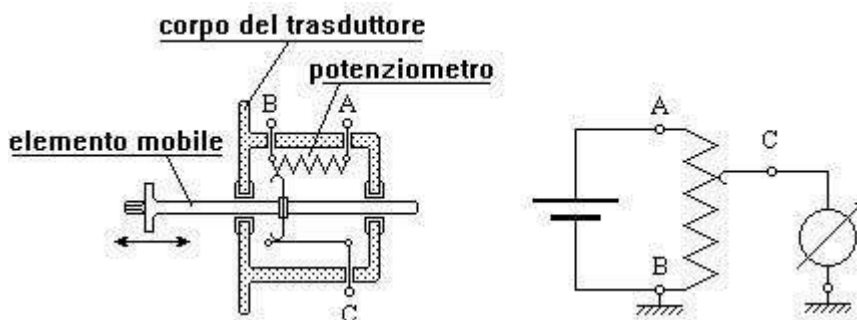


Fig.1.4 - Funzionamento schematico di un trasduttore di posizione: l'elemento mobile, spostandosi in base alla grandezza di ingresso, determina la variazione della tensione in uscita al morsetto C

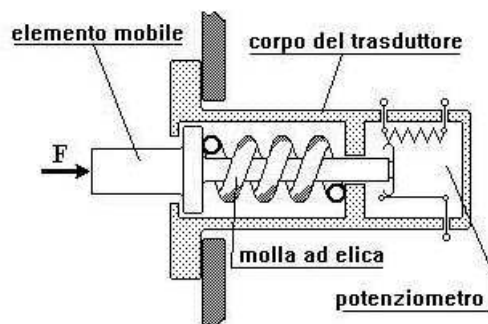


Fig. 1.5. - Trasduttore "forza-tensione elettrica": rappresentazione semplificata della catena di trasduzione con il primo trasduttore elementare (o "sensore") "forza-spostamento" ed il secondo trasduttore elementare "spostamento-tensione elettrica"

1.4.1 Parametri caratteristici

Una scelta errata del sensore può costituire un deficit di progetto in grado di compromettere pesantemente la funzionalità di un intero sistema. Si pensi ad esempio ad un trasduttore temperatura/corrente la cui sensibilità sia relativa ad un range termico diverso da quello previsto nelle specifiche della particolare applicazione, oppure ad un sensore di luminosità che risulti poco sensibile per rilevare le variazioni assegnate.

Fissato il tipo di sensore per una determinata applicazione, è dunque fondamentale per il progettista essere in grado di ben interpretare una notevole quantità di dati, spesso eterogenei, forniti dai costruttori. Sfogliando i cataloghi di prodotto ci si accorge tuttavia dell'esistenza di un insieme di caratteristiche che, essendo indipendenti dalla "natura" delle grandezze d'ingresso e di uscita, risultano comuni a quasi tutte le tipologie di sensori. La conoscenza di tali caratteristiche può costituire dunque un'utile base di partenza per prevedere le performance offerte da un certo sensore sulla base dei data sheet forniti dai costruttori.

Si riportano qui di seguito le principali caratteristiche di un sensore.

- **Funzione di trasferimento.**

È sicuramente la più importante tra le caratteristiche poiché da essa è possibile dedurre molte informazioni sul sensore. Rappresenta il legame esistente tra grandezza di ingresso e grandezza di uscita ed è comunemente espressa dai costruttori in forma grafica o tabellare, più raramente in forma analitica (cioè mediante una relazione matematica).

In molte applicazioni si rende necessaria una distinzione tra caratteristica statica e dinamica. La prima esprime il legame ingresso/uscita che si ottiene facendo variare molto lentamente (rispetto alle costanti di tempo intrinseche del sensore) la grandezza di ingresso. La caratteristica dinamica riferisce invece dello stesso legame nel caso in cui la grandezza di ingresso vari rapidamente. Da essa è possibile desumere molte caratteristiche peculiari del sensore quali, ad esempio: il ritardo di risposta, il tempo di assestamento, le costanti di tempo naturali.

Un metodo a volte attuato per determinare alcuni parametri dinamici di un sensore è quello di sottoporre lo stesso ad una rapidissima variazione impulsiva della grandezza di ingresso e nel misurare il corrispondente andamento della grandezza in uscita. Un metodo equivalente nel caso di sistemi lineari è quello della risposta in frequenza (trasformata di Fourier della risposta impulsiva).

- **Range di impiego.**

È l'intervallo compreso tra due valori nella grandezza fisica di ingresso entro il quale è garantito il rispetto di tutte le altre caratteristiche dichiarate dal costruttore. Detto a volte (impropriamente) dinamica.

- **Caratteristiche dell'uscita.**

La grandezza d'uscita può essere una tensione, una corrente o una potenza (prodotto $V \times I$), ma anche una resistenza, un'induttanza o una capacità. Nel caso in cui essa sia un segnale elettrico è fondamentale, per il progetto degli stadi di elaborazione successivi al sensore, che venga specificato, nelle varie condizioni, il livello di impedenza equivalente nonché i valori massimo e minimo che la grandezza di uscita può assumere prima delle inevitabili non linearità (saturazione del sensore).

A volte il bipolo sensore viene caratterizzato in uscita mediante una curva tensione-corrente. Tale curva può essere poi utilmente linearizzata nell'intorno del punto di funzionamento al fine di trarre tutte le informazioni necessarie. Alcuni sensori attivi incorporano un convertitore A/D che rende il segnale di uscita digitale. Zero point: è il valore della grandezza di ingresso assunto come livello zero (riferimento) nella misura. Lo zero point rende a volte necessaria una calibrazione della misura con l'aggiunta di un *offset*¹ alla grandezza di uscita.

- **Sensibilità.**

Ad ogni valore della grandezza di ingresso, corrisponde un valore della grandezza di uscita, di conseguenza ad ogni variazione della prima corrisponde una variazione della seconda. Il rapporto tra tali variazioni, definisce la sensibilità del sensore. Quest'ultima è quindi espressa in unità di grandezza di uscita divise per unità di grandezza di ingresso. Ad esempio se due sensori di temperatura hanno sensibilità rispettivamente di $1\text{mA}/^{\circ}\text{C}$ e di $0,1\text{mA}/^{\circ}\text{C}$ il primo è dieci volte più sensibile del secondo.

- **Risoluzione.**

È la più piccola variazione della grandezza di ingresso che dà luogo ad una variazione apprezzabile della grandezza di uscita. Da non confondere con la sensibilità. È generalmente espressa in % del fondo scala. Ad esempio, una sensibilità del 5% per un sensore termico che operi nel range $0 \div 100^{\circ}\text{C}$ indica che la minima variazione di temperatura percettibile è di 5°C . La stessa sensibilità per un sensore che operi invece nel range $0 \div 1000^{\circ}\text{C}$ (ad esempio per applicazioni in forni), indica una minima variazione percettibile di ben 50°C . Il sensore non produrrà quindi alcuna variazione del proprio segnale di uscita per cambiamenti della temperatura inferiori a 5°C o a 50°C rispettivamente.

- **Errore.**

Per un sensore hanno importanza principalmente tre tipi di errore: quello assoluto, quello di linearità e quello da isteresi. L'errore assoluto rappresenta

¹ Negli amplificatori operazionali la tensione di offset in ingresso (V_{OS}) è la tensione che deve essere applicata ad uno dei terminali di ingresso per produrre una tensione di uscita uguale a zero.

la differenza tra valore misurato e valore effettivo della grandezza di ingresso. Di errore di linearità si parla nei casi in cui la caratteristica statica è desiderata essere rettilinea: essa rappresenta infatti, nell'intervallo considerato, la differenza massima esistente tra la retta reale e la caratteristica reale (vi sono tuttavia altri metodi per definire un errore di linearità).

1.4.2 Condizionamento del segnale di uscita

Una volta scelto il tipo di sensore più adatto ad una particolare applicazione, è possibile fare opportune ipotesi sul trattamento che si intende riservare al segnale da esso generato. L'uscita di un trasduttore solo di rado può essere direttamente collegata ad uno strumento di misura, di elaborazione o di visualizzazione.

Il segnale elettrico in uscita dal sensore/trasduttore, oltre a contenere componenti indesiderate, è in genere troppo rumoroso e debole (valori dell'ordine dei *millivolt* o dei *picoampere*) per poter essere trasmesso a distanza. In questo caso è necessaria la presenza di un circuito di interfaccia che ottimizzi il collegamento fra dispositivo sensibile e carico. Pertanto, a causa della "incompatibilità" fra l'uscita del sensore/trasduttore e l'ingresso del sistema di acquisizione (carico) è necessaria una opportuna operazione di *condizionamento* sul segnale di uscita dal sensore/trasduttore.

Il condizionamento, consiste in un adattamento delle caratteristiche del segnale a quelle che sono le esigenze della misura ed alle peculiarità dei successivi stadi di elaborazione.

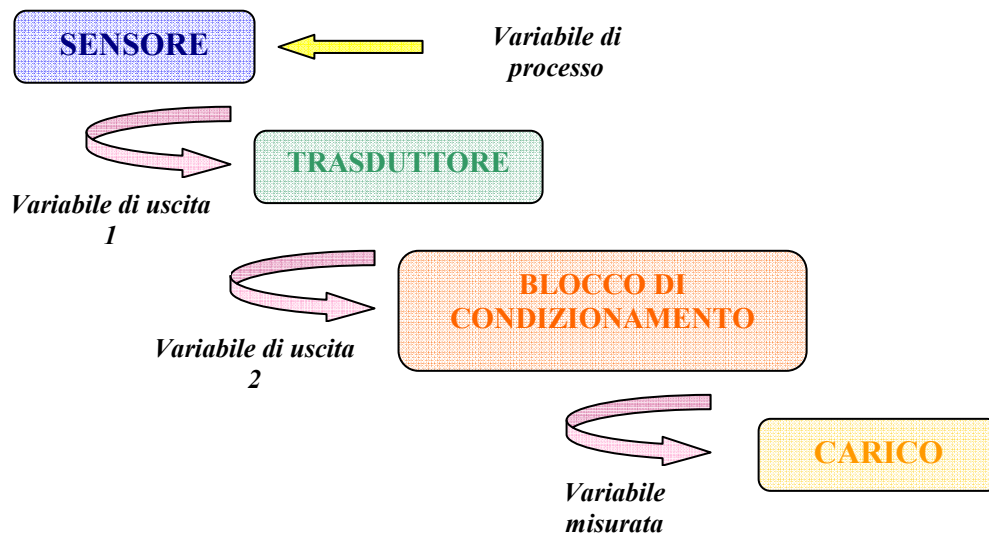


Fig. 1.6 - Funzione del blocco di condizionamento nello schema di un trasduttore

Le modalità di condizionamento dipendono essenzialmente dalle caratteristiche elettriche del sensore e dalla destinazione del segnale.

I principali processi di condizionamento consistono fondamentalmente in:

- isolamento galvanico;
- adattamento di impedenza;
- amplificazione;
- linearizzazione;
- traslazione di livello.

Nel caso di sistemi di telemisure ed acquisizione di dati remoti il condizionamento può essere realizzato nelle vicinanze del trasduttore, oppure nelle vicinanze del sistema di elaborazione.

La scelta dipende da molteplici fattori, primi tra i quali il livello di rumore presente lungo la linea di trasmissione (che collega il sensore al sistema di acquisizione) e le condizioni operative del sensore (queste potrebbero precludere un condizionamento nello stesso luogo del trasduttore: si pensi ad esempio a misuratori di temperatura posti nei forni).

La più comune forma di condizionamento prevede l'amplificazione e/o la traslazione e/o l'espansione/compressione della dinamica del segnale al fine di portare la stessa in un range di variazione che risulti standard per i sistemi di acquisizione dati: tipicamente 0-10V in tensione o 4-20mA in corrente.

Segue l'illustrazione di alcuni particolari trasduttori di deformazione (estensimetri), di forza e di coppia (celle di carico), misuratori di corrente (multimetri digitali) e amplificatori.

1.4.3 Estensimetri

Gli strumenti che misurano la deformazione vengono detti “estensimetri”: essi sono sensibili, in genere, agli spostamenti relativi fra due punti della superficie lungo la direzione della loro congiungente. La distanza fra i due punti è fissata dall'estensimetro stesso, del quale è una caratteristica costruttiva, e viene detta “base dell'estensimetro”. Dalla misura dello spostamento fra i punti delimitanti la base, si risale facilmente alla deformazione media esistente nel tratto limitato dalla base stessa, e questo viene fatto tarando direttamente lo strumento. Ne deriva che è opportuno, qualora si temano concentrazioni di sforzi in determinate zone, impiegare estensimetri con una base piccola, in modo da avvicinarsi il più possibile al valore locale reale della deformazione. D'altra parte, minore è la base, maggiore è l'amplificazione necessaria per ottenere la medesima sensibilità dello strumento, col rischio di aumentare eccessivamente gli errori. Per cui, in definitiva, occorrerà di volta in volta scegliere il valore della base in modo da ottenere un compromesso accettabile fra le due esigenze.

Gli estensimetri possono classificarsi, secondo il loro principio di funzionamento, come segue:

1. estensimetri a resistenza elettrica;
2. estensimetri meccanici;
3. estensimetri acustici;
4. estensimetri pneumatici;
5. estensimetri ottici.

Essi vanno mantenuti a contatto con la superficie dell'elemento, del quale si vogliono misurare le deformazioni, mediante viti, nastri o molle (ad eccezione di quelli a variazione di resistenza elettrica che vanno incollati con speciali collanti). Una buona precisione nella misura è quindi condizionata dal fatto che l'estensimetro segua fedelmente le deformazioni della superficie.

Ove si possono escludere fenomeni che facciano temere concentrazioni locali di sollecitazioni (ad esempio di fatica), si può aiutare l'aderenza fra estensimetro e superficie prevedendo delle piccole nicchie in corrispondenza dei coltelli (quando vi sono) coi quali l'estensimetro tocca il pezzo.

Da tener presente che, con l'avvento degli estensimetri elettrici, gli altri tipi di estensimetri hanno perso molto della loro utilità: molti di essi sono caduti completamente in disuso, mentre altri, pur essendo meno usati, mantengono ancora una certa importanza per alcune peculiari proprietà.

Gli estensimetri elettrici a resistenza consistono in un filo (fig. 1.7 e fig. 1.8) di lega speciale, di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0.01 a 0.03mm), disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce. Il supporto viene a sua volta incollato al pezzo nella zona nella quale si desidera conoscere la deformazione.

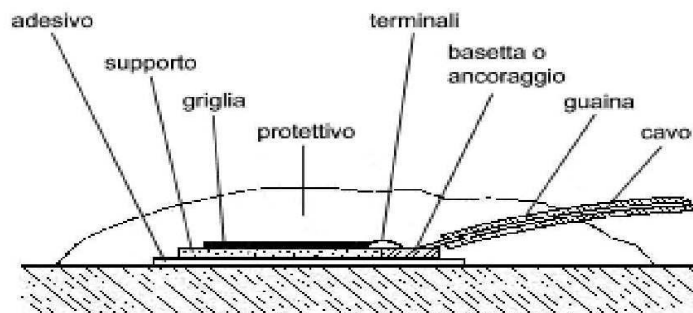


Fig. 1.7 - Schema di un estensimetro a resistenza

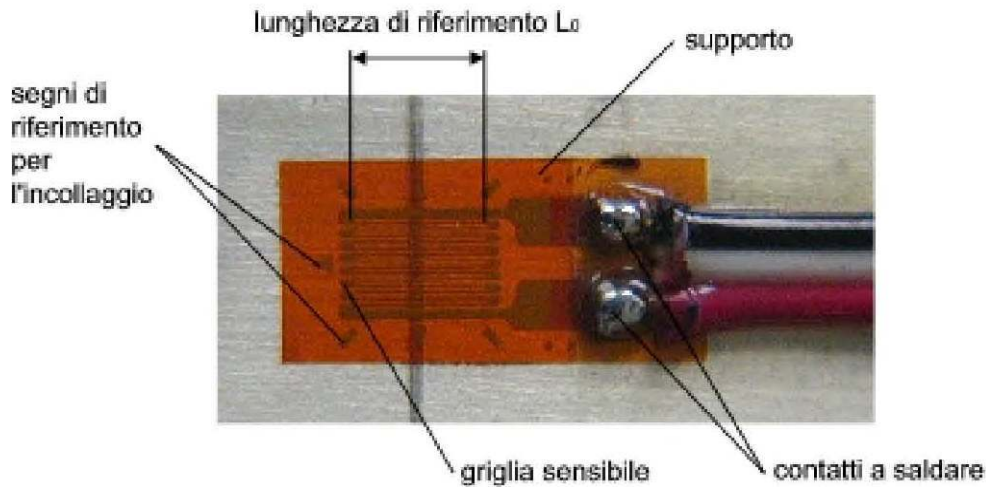


Fig. 1.8 - Immagine di un estensimetro a resistenza

Se, una volta incollato, si mette il pezzo sotto carico, l'estensimetro seguirà le deformazioni del pezzo presentando le medesime sue dilatazioni. Il filo, allungandosi o accorciandosi, presenta una variazione di resistenza elettrica per il verificarsi di due fenomeni: l'allungamento (o accorciamento), accompagnato da una diminuzione (o aumento) di sezione, e la variazione di resistività, che si ha in un materiale al variare della sollecitazione. Per molti tipi di estensimetri a costante elevata tale fenomeno è preponderante.

Data la conformazione dell'estensimetro, col filamento disposto prevalentemente in una direzione (x, ad es.), esso è molto sensibile alle dilatazioni lungo quella direzione e poco nell'altra direzione (y) perpendicolare alla prima. Per tale motivo, va montato in modo da far coincidere la direzione privilegiata di sensibilità con quella della deformazione da misurare. Naturalmente, la sensibilità alla dilatazione in direzione y, anche se modesta, diventa fattore di disturbo nella misura (perchè diminuisce in definitiva la sensibilità nella direzione x).

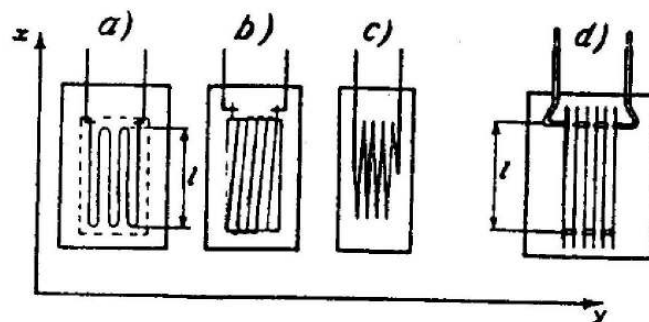


Fig. 1.9 - Tipi diversi di estensimetri a resistenza

Si preferisce, in genere, costruire l'estensimetro secondo lo schema di fig. 1.9c e d: nel caso d, la resistenza non è più costituita da un filo continuo, ma da più fili paralleli collegati in serie con altri piccoli tratti di filo di sezione maggiore e di materiale di elevata conduttività elettrica (cioè di resistenza molto bassa) in modo che le variazioni di resistenza (anche percentuali) di questi tratti risultino trascurabili.

La lunghezza l è la base dell'estensimetro: essa non va confusa con l'ingombro longitudinale, che è sempre superiore rispetto alla base a causa delle maggiori dimensioni del supporto e dell'esistenza dei terminali della resistenza. Le lunghezze più comuni della base sono 5 mm, 10 mm, 20 mm; esistono però estensimetri con base anche maggiore o minore.

I valori più comuni della resistenza vanno da 120Ω a 1000Ω , che vengono garantiti dal costruttore con una certa tolleranza (ad es. resistenza $350 \pm 3 \Omega$). Il valore della resistenza è riportato sulle bustine che contengono ognuna un certo numero di estensimetri (5 o 10); la tolleranza sul valore della resistenza significa che tutti gli estensimetri contenuti nella busta hanno un valore della resistenza contenuto entro i limiti da essa stabiliti.

1.4.3.1 Variazioni di resistenza indotte dalla deformazione

Nel regime elastico l'allungamento è proporzionale alla forza per unità di superficie ed alla lunghezza:

$$\Delta l = \frac{1}{E} \left(\frac{F}{S} \right) l, \quad (27)$$

dove $\frac{1}{E}$ = coefficiente di allungamento ed E è il modulo di Young.

Per $\frac{F}{S} = E$, in regime elastico, $\Delta l = l \longrightarrow$ raddoppio di l .

Per ogni dimensione lineare trasversale vale:

$$\Delta w = -\frac{1}{B} \left(\frac{F}{S} \right) w, \quad (28)$$

dove $\frac{1}{B}$ = coefficiente di contrazione e B il modulo di contrazione trasversale.

Si definisce un rapporto tra la variazione longitudinale e trasversale:

$$\nu = \frac{\left(-\frac{\Delta w}{w} \right)}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{1}{E}} = \frac{E}{B} = \text{fattore di Poisson}. \quad (29)$$

1.4.3.2 Fattore di Gage

La caratteristica di maggiore interesse nell'estensimetro è la sensibilità con cui la resistenza si modifica in conseguenza della deformazione; per giungere però ad un tale parametro, si deve preventivamente stabilire come misurare la deformazione.

Facendo riferimento ad una struttura cilindrica di altezza pari ad L in condizioni di riposo, si ipotizzi di applicare una sollecitazione assiale di trazione: il cilindro subirà una deformazione più o meno evidente a seconda dell'intensità della sollecitazione, delle caratteristiche del materiale e della geometria, mentre l'altezza subirà un'allungamento pari a ΔL . Il rapporto $\Delta L/L$ è la deformazione longitudinale subita dal cilindro. Il valore del rapporto, indicato col simbolo ε , viene chiamato "*strain*".

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (30)$$

Lo strain è adimensionale per come è definito, tuttavia si usa esprimerlo in "*microstrain*" (μstrain), quasi come se fosse una vera e propria unità di misura. Ne deriva che l'espressione della sensibilità dell'estensimetro diventa il rapporto tra la variazione relativa di resistenza $\Delta R/R$ e il valore dello strain. Questo fattore viene comunemente indicato con il termine di "*gage factor*" (GF).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (31)$$

Il valore del gage factor dipende dal materiale utilizzato per la realizzazione dell'estensimetro (per gli estensimetri metallici GF è compreso fra 2 e 4) e, quindi, dalla temperatura (diminuisce all'aumentare di questa).

Dalla definizione di GF discende, poi, quella della sensibilità espressa come variazione relativa di resistenza dell'estensimetro provocata dalla deformazione:

$$s = \frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta L}{L} = GF \cdot \varepsilon \quad (32)$$

Dato che i valori consueti delle deformazioni specifiche che le strutture reali possono presentare sono inferiori a 10.000 μstrain (di solito non superano i 1.000 μstrain), si comprende come la variazione relativa della resistenza dell'estensimetro metallico sia molto ridotta.

1.4.3.3 Influenza della temperatura

La temperatura influenza il funzionamento dell'estensimetro sotto vari aspetti, i principali dei quali sono:

- vi è un limite di temperatura che non può essere superato, pena il danneggiamento dell'estensimetro;
- la resistenza del filo varia al variare della temperatura;
- l'estensimetro, sottoposto ad una variazione di temperatura, si dilata: se queste dilatazioni sono impedito, del tutto o in parte, nasce nell'estensimetro uno stato di sollecitazione che si aggiunge a quello dovuto ai carichi;
- la costante dell'estensimetro varia con la temperatura, in quanto il modo di variare della resistività, al variare della deformazione, dipende dal valore della temperatura.

Per quanto riguarda la temperatura limite, è da osservare che essa dipende non solo dalla lega con la quale è costituito il filo, ma anche dalla natura del supporto e dall'adesivo impiegato. Si è visto che il supporto può essere di carta, e in tal caso la temperatura limite non può essere molto elevata ($50\div 60^{\circ}\text{C}$), o in bachelite o altre resine, e in tal caso, con collanti appropriati, ad esempio a base di resine polimerizzanti con additivi o a caldo (resine termoindurenti), si raggiungono temperature limiti più elevate (150°C e anche più). Inoltre il limite di temperatura può essere più elevato nel caso di misure dinamiche che nel caso di misure statiche, poichè sotto sollecitazioni costanti sono più facilmente presenti fenomeni di scorrimento fra filo, supporto e adesivo, e, se la temperatura è abbastanza elevata, anche fenomeni di rilassamento delle sollecitazioni nel filo: vi è quindi da temere una riduzione della sollecitazione del filo stesso, con conseguenti errori nella misura. Si noti infine che il riscaldamento può essere prodotto sia dalla temperatura elevata del pezzo, sia dalla corrente che passa nell'estensimetro.

Per quanto riguarda il variare della resistenza al variare della temperatura, si definisce **coefficiente di temperatura** dell'estensimetro il rapporto fra la variazione di resistenza, riferita alla unità di resistenza, e la variazione di temperatura di 1°C . Se si hanno a temere variazioni di temperatura, occorre quindi che tale coefficiente risulti il più possibile basso.

Per quanto riguarda le eventuali dilatazioni impedito, vi è da tener presente che tali impedimenti possono sorgere sia perchè solo l'estensimetro subisce la differenza di temperatura (perchè in esso vengono fatte passare correnti elettriche eccessive), sia perchè il pezzo in esame non può dilatarsi, sia infine perchè tanto il pezzo quanto l'estensimetro sono sottoposti alla variazione di temperatura, ma i loro coefficienti di dilatazione sono diversi. In tal caso l'estensimetro sarà sottoposto ad una sollecitazione di compressione o di trazione a seconda che il suo coefficiente di dilatazione sia rispettivamente maggiore o minore di quello del pezzo.

Infine per quanto riguarda la variazione della costante dell'estensimetro con la temperatura, essa in genere si mantiene praticamente costante fino a $60\div 70^{\circ}\text{C}$ per poi calare bruscamente per valori superiori della temperatura.

I mezzi per ovviare a questi inconvenienti prodotti dalla temperatura sono sostanzialmente i seguenti:

- 1) Impiegare nel circuito a ponte di misura un secondo estensimetro (estensimetro compensatore) montato su un pezzo non sollecitato, dello stesso materiale del pezzo in esame, e inserito nel ponte in modo che un vertice del ponte stesso sia comune ai due estensimetri: in tal caso se l'estensimetro ha lo stesso coefficiente di temperatura, ed è portato alla stessa temperatura di quello di misura, il ponte non risente delle variazioni di resistenza dovuta alla variazione di temperatura, come pure delle dilatazioni impedita.
- 2) Impiegare estensimetri autocompensati. Essi possono essere costituiti con materiale che presenta un coefficiente di temperatura e un coefficiente di dilatazione (in rapporto con quello del pezzo in esame) tali che non si risenta praticamente delle variazioni di temperatura, almeno nel campo di temperatura di utilizzo. Altri tipi di estensimetri autocompensati hanno invece un tratto di filo di materiale apposito in serie col filo principale (figura 2.10a), avente un coefficiente di temperatura diverso da quello del filo principale.
- 3) Impiegare estensimetri autocompensati universali, corrispondenti allo schema di figura 2.10b. Il filo posto in serie a quello dell'estensimetro vero e proprio ha, anche in questo caso, un andamento del coefficiente di dilatazione in funzione della temperatura diverso da quello dell'estensimetro. Tale filo viene messo in parallelo ad una resistenza, eventualmente regolabile, in modo che il comportamento globale dell'estensimetro al variare della temperatura possa adattarsi a quello del materiale sul quale è destinato a lavorare. Poichè tale regolazione è fatta in funzione della temperatura, in alcuni casi è incorporata nell'estensimetro una coppia termoelettrica che permette appunto il rilievo diretto della temperatura alla quale si trova l'estensimetro.

Nella tab. 1.1 sono riportate le caratteristiche di alcuni materiali impiegati nella costruzione degli estensimetri a resistenza elettrica. I dati riportati in tabella sono solo indicativi in quanto influenzati da vari fattori (ad esempio il procedimento di fabbricazione).

Tab. 1.1 - Caratteristiche di alcuni materiali per estensimetri

Legg o metallo	Composizione in %	Costante	Coeff. di temperatura $\frac{m\Omega}{\Omega}$	Resistività $\frac{\Omega}{mm^2}$
Nicromo	Ni 80, Cr 20	+2	+0,3	390
Manganina	Ni 4, Mn 12, Cu 84	+0,5	+0,01	160
Advance	Ni 45, Cu 55	+2,1	$\pm 0,002$	195
Copel	Ni 45, Cu 55	+2,4	$\pm 0,002$	195
Costantana	Ni 60, Cu 40	+2,1	$\pm 0,02$	195
Isoelastic	Ni 36, Cr 8, Fe 52, Mo 0,5	+3,5	$\pm 0,470$	415
Karma	Ni 73, Cr 20, Al, Fe, ed altri	+2,4	+0,020	6200
Nichel		-12	+6,000	44

1.5 Celle di carico

Il cuore di ogni sistema di pesatura è costituito dalle celle di carico. Sebbene queste non abbiano un aspetto interessante, risultano essere dei trasduttori altamente accurati, che forniscono all'utente informazioni generalmente non ottenibili con altre tecnologie a causa di problemi di carattere economico.

Le celle di carico sono progettate per misurare forza o peso in condizioni molto avverse di un gran set di parametri. Esse non solo costituiscono la parte fondamentale di un sistema di pesatura, ma anche la più vulnerabile. Al fine di ottenere da esse le massime prestazioni, l'utente deve possedere una approfondita e completa conoscenza della tecnologia, costruzione e funzionalità presenti in quest'unico dispositivo. Inoltre, è importante che l'utente selezioni la cella di carico più appropriata alla specifica applicazione e provveda alla sua manutenzione durante tutto il ciclo di vita. Il rispetto e la messa in pratica di una manutenzione adeguata assicurerebbero una pesatura priva di problemi per un lungo periodo di tempo.

Le celle di carico possono essere danneggiate da sovraccarichi di tipo impulsivo, black-out o sovraccarichi di corrente, inquinamento da agenti chimici o sporcizia, maneggiamento inappropriato (cadute, urti, sollevamenti, etc.), vibrazioni, eventi sismici e malfunzionamento dei componenti interni.

Esse sono dei sistemi in cui un ponte estensimetrico viene utilizzato per misurare la deformazione di un opportuno "modificatore" meccanico. Tramite questo modificatore una forza, oppure un momento, viene trasformata in una deformazione misurabile. La forma del modificatore può essere la più varia: si usano, per esempio, cilindri per le sollecitazioni di sforzo assiali oppure "doppie mensole incastrate" per sollecitazioni lungo assi paralleli, ma disassati. Sollecitazioni più complesse, ad esempio i momenti torcenti, richiedono l'uso di modificatori abbinati a particolari meccanismi.



Fig. 1.10 - Cella di carico digitale

1.5.1 Struttura di una cella di carico

Il componente meccanico più critico di qualsiasi cella di carico, insieme a ogni estensimetro, è lo “*Spring Element*”. In termini generali, lo *spring element* funziona da elemento di reazione al carico applicato e concentra tale carico in un percorso di tensione uniforme e calcolato per una misurazione precisa da parte degli estensimetri collegati. La criticità per tale funzione è che nel livello di tensione nella zona di misura, lo *spring element* risponde in maniera lineare e ripetibile al carico applicato.

La cella di carico ideale dovrebbe produrre, in maniera ripetibile, una relazione di tipo proporzionale tra la tensione e il carico indotto. Il conseguimento di tale obiettivo è reso difficile dalla presenza di numerose implicazioni di tipo economico e requisiti di performance che devono essere soddisfatti contemporaneamente. Ad aumentare tale difficoltà si aggiungono i numerosi effetti di secondo e terzo ordine, come la frequenza naturale e la sensibilità termica che assumono una importanza rilevante nella realizzazione di un dispositivo di precisione per la misura di una forza.

I tipi di sollecitazione fondamentali che sono alla base del progetto delle celle di carico sono tre: trave flessa (*bending beam*), sollecitazione assiale (*axial stress*) e taglio (*shear*).

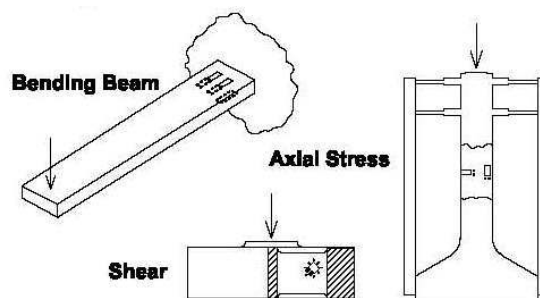


Fig. 1.11 - Tipologie di carichi per il progetto delle celle di carico

- **Bending Beam:** gli *spring elements* delle celle di carico che utilizzano tale configurazione sono i più comuni in tutti i moderni tipi di trasduttori. Questo perché lo schema trave flessa è un componente strutturale del tipo alta-resistenza e bassa-forza che offre due superfici uguali ed opposte per l'incollaggio degli estensimetri.
- **Axial Stress:** la cella di carico del tipo a colonna è uno dei primi tipi di trasduttori con estensimetri. Sebbene sia semplice come concezione progettuale, tale tipologia di *spring element* necessita di una serie di precisazioni tecniche. La colonna deve essere lunga abbastanza (rispettando le proporzioni della sezione trasversale) in modo da consentire l'applicazione di un percorso di carico uniforme

per gli estensimetri. Inoltre, non di secondaria importanza, sono gli effetti di secondo ordine a cui può essere sottoposta una colonna alta, come ad esempio carichi casuali fuori asse. Un effetto di questo tipo può essere minimizzato con un opportuno isolamento con diaframma.

- *Shear*: la forma di una cella di carico di questo tipo è generalmente quella di una trave a sbalzo disegnata con una sezione trasversale più grande del normale, ma nel rispetto della percentuale di carico da sorreggere al fine di minimizzare la deflessione. In queste condizioni la superficie di tensione lungo la parte superiore della trave sarebbe troppo bassa per produrre un segnale elettrico apprezzabile dall'estensimetro. Tuttavia, se gli estensimetri sono posizionati sui lati della trave in corrispondenza dell'asse neutro, dove la flessione è nulla, lo stato tensionale risulta di taglio puro che agisce nelle direzioni verticale e orizzontale.

Gli elementi sensibili ("*spring element*") sono progettati in modo tale da sviluppare una tensione direttamente proporzionale al carico applicato. Tali elementi vengono, in generale, realizzati in leghe di acciai altamente resistenti (placcati al nickel per la protezione dell'ambiente circostante), precipitati di acciai inossidabili temprati, leghe di alluminio trattate termicamente o leghe di rame-berillio.

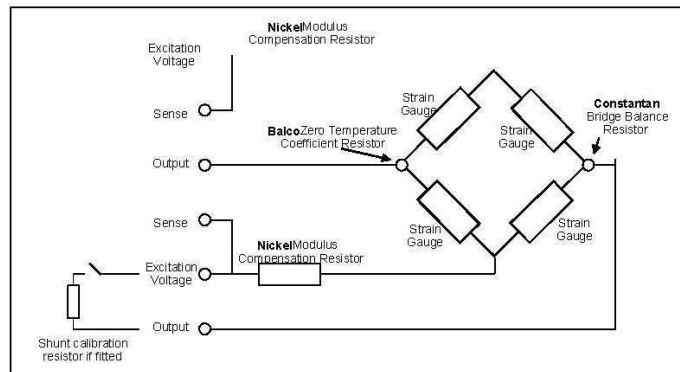


Fig. 1.12 - Tipico schema di collegamento degli estensimetri nelle celle di carico in commercio

Collegando gli estensimetri ad elementi macchinati ad alta precisione, la forza applicata può essere identificata in termini di variazione di resistenza. Gli estensimetri, solitamente in numero di quattro o multipli di quattro, vengono collegati ad un ponte di Wheatstone al fine di convertire una piccola variazione di resistenza in un segnale elettrico apprezzabile. I componenti passivi, come le resistenze e i fili, che dipendono dalla temperatura, vengono usati per compensare e calibrare il segnale di uscita del ponte.

1.5.2 Tipologie di celle di carico in commercio

I diversi principi di funzionamento sono illustrati qui di seguito, nelle figg. 13a e b.

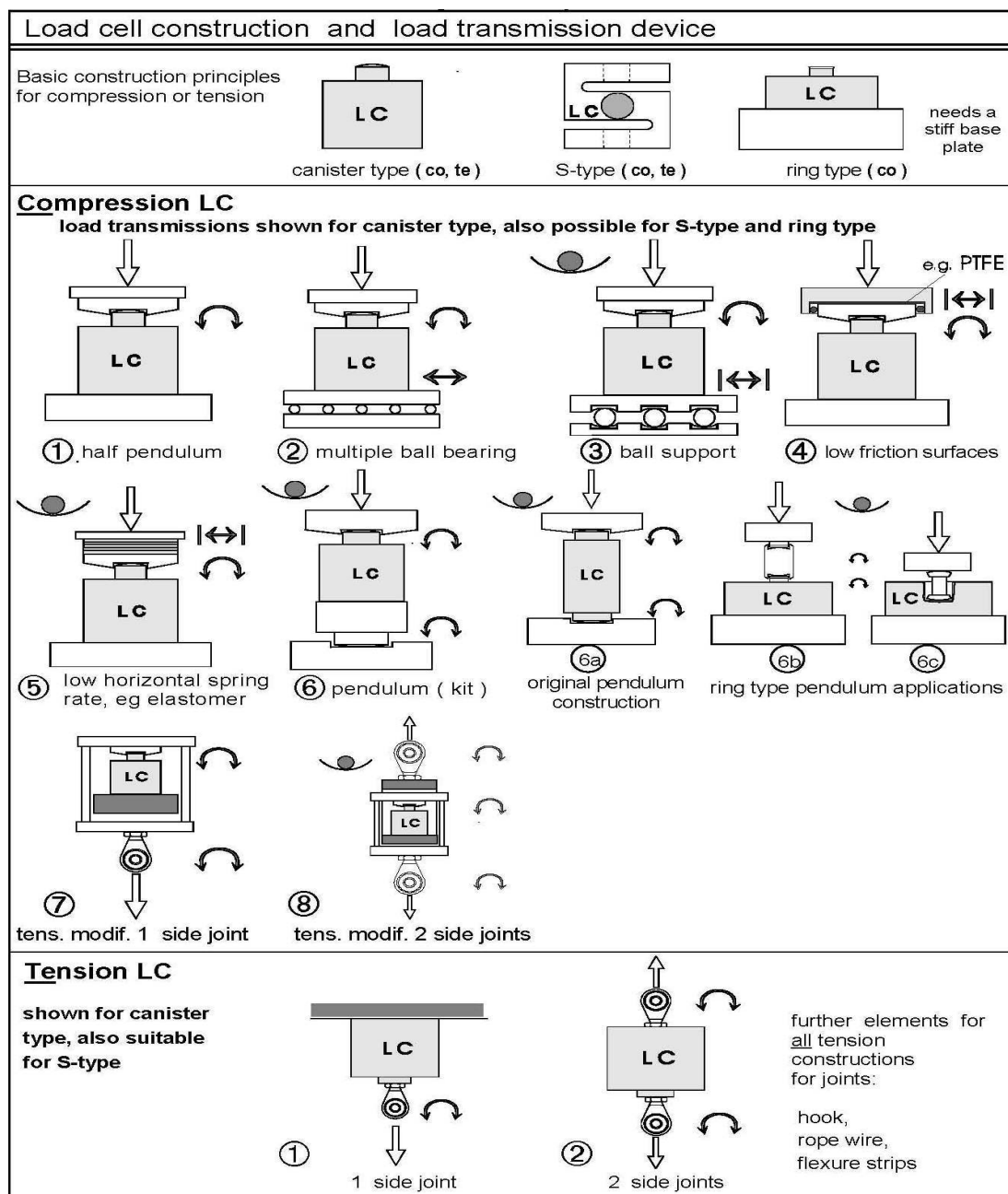


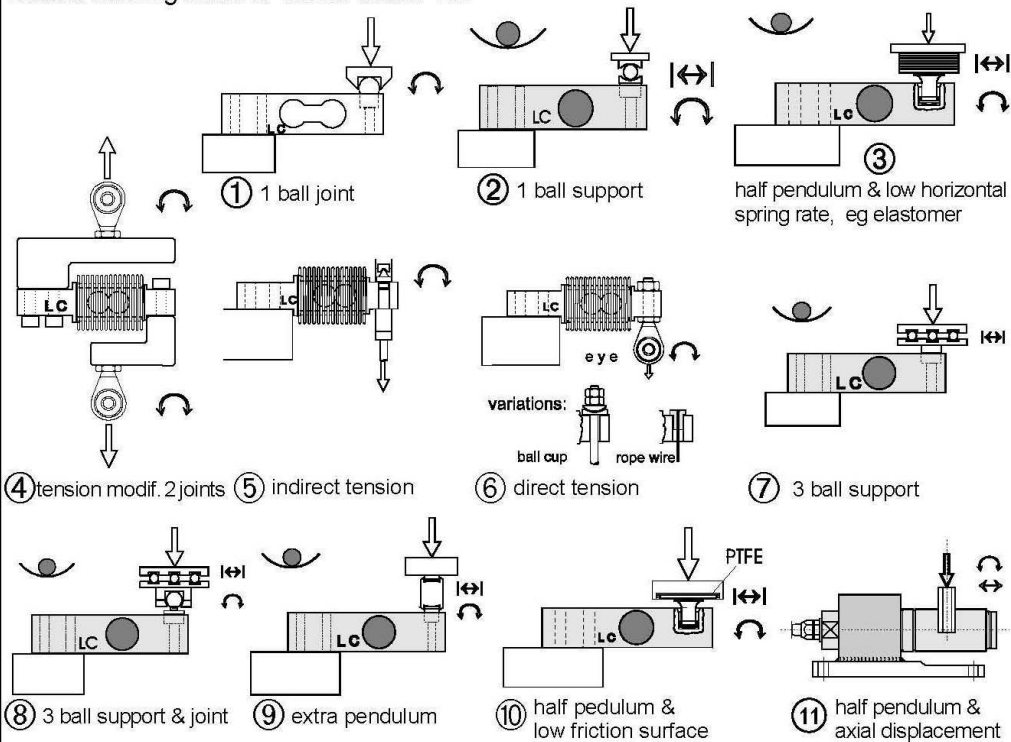
Fig. 1.13a - Schema riassuntivo delle celle di carico e dispositivi di trasmissione

Load cell construction and load transmission device

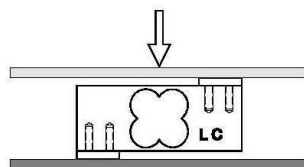
The load transmission device is independent of the encapsulation, potting or housing and the mounting at the fixed end shown below

Beam LC - Cantilever beam

Double bending beam & Shear beam LC



Single point LC

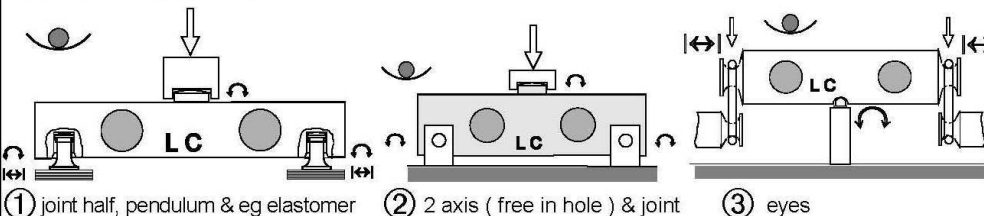


The single point LC has no degree of freedom for horizontal displacement or inclination, using more than one LC in a load receptor decoupling elements are necessary.

The load transmissions 1 to 10 for the beam LCs may be applied.

Max. platform dimensions may be mentioned in the TC or the TAC.

Double ended beam LC



Constructions with fixed clamping at the two ends need for minimum displacement and inclination some elasticity of the supporting construction.

Fig. 1.13b - Schema riassuntivo delle celle di carico e dispositivi di trasmissione

I criteri di scelta, in un contesto generale e senza la necessità di risolvere un problema in particolare riguardano, prima di tutto, la capacità, la classe di precisione e la protezione dell'ambiente circostante piuttosto che la misura della sollecitazione specifica come la flessione, il taglio, la compressione o la torsione. Affermando ciò dovrebbe essere altresì chiaro che una particolare grandezza da misurare potrebbe offrire diversi vantaggi in termini di capacità di sovraccarico o di facilità di montaggio.

1.5.2.1 Celle sottoposte a carico flettente

Per i trasduttori in commercio vengono largamente utilizzati, in molteplici configurazioni, elementi sensibili soggetti a momenti flettenti. Le travi a flessione offrono elevati livelli di tensione in corrispondenza di livelli di carico relativamente bassi, cosa che li rende ideali per l'utilizzo in celle di carico a bassa capacità. Inoltre, nel caso di sollecitazione flettente con sezione trasversale simmetrica rispetto agli assi di flessione, esistono sempre due superfici di tensione uguali e di segno opposto. Ciò offre mezzi convenienti per l'implementazione di un circuito a ponte intero, mentre la compensazione della temperatura risulta relativamente semplice.

La flessione, come forza da misurare in sé per sé, presenta, in generale, una buona linearità. Le travi sottoposte a flessione hanno livelli di tensione relativamente alti e una deflessione maggiore rispetto ad altri metodi di misurazione. Ciò, di conseguenza, implica che, nonostante la cella sia sottoposta ad un elevato sovraccarico statico, l'interruzione di tipo meccanico risulti più facilmente attuabile. Le capacità di sovraccarico meccanico risultano eccellenti a causa della caratteristica deflessione molto ampia.

1.5.2.2 Celle di carico sottoposte a taglio

Le celle di carico del tipo trave sottoposta a taglio sono diventate maggiormente utilizzate per tutti i tipi di applicazioni che implicano capacità medie e alte. Il taglio, come grandezza da misurare, offre un profilo standard per una data capacità, una buona resistenza ai carichi laterali e una sensibilità relativamente bassa rispetto al punto di applicazione del carico.

In questo caso, lo *spring element* assume la forma di una trave incastrata progettata con una generosa sezione trasversale (nel rispetto del carico applicato) al fine di rendere minima la deflessione. In queste condizioni, la tensione superficiale lungo la parte superiore e inferiore della trave risulterà troppo bassa per produrre un output di 2mV/V, che è quello normalmente apprezzabile da un esntensimetro. Nella sezione A-A della trave viene realizzato, su ognuno dei lati, un vano, lasciando nel mezzo uno spessore molto sottile. In questo modo la

maggior parte del carico applicato viene sostenuta dal telaio, mentre il momento flettente viene sostenuto principalmente dalle flange.

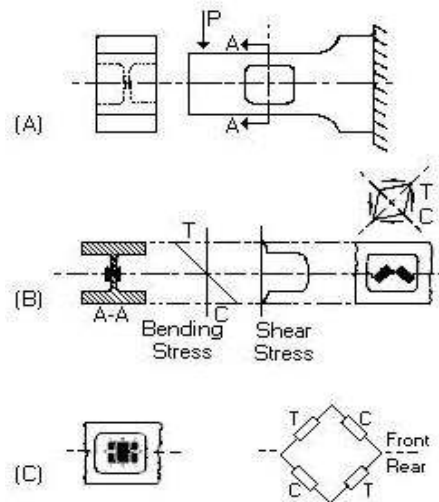


Fig. 1.14 - Schema di una cella di carico Shear-web (a), distribuzione del carico (b) e schema circuitale (c)

In corrispondenza dell'asse neutro, dove il carico flettente è trascurabile, lo stato tensionale sul telaio risulta di taglio puro, agente nella direzione orizzontale e verticale. Ne consegue che gli assi principali si trovano a 45° rispetto all'asse longitudinale della trave e le tensioni corrispondenti sono uguali in modulo e opposte in segno.

Su entrambi i lati del telaio vengono incollate coppie di estensimetri collegati su un circuito a ponte intero per la misurazione del carico.

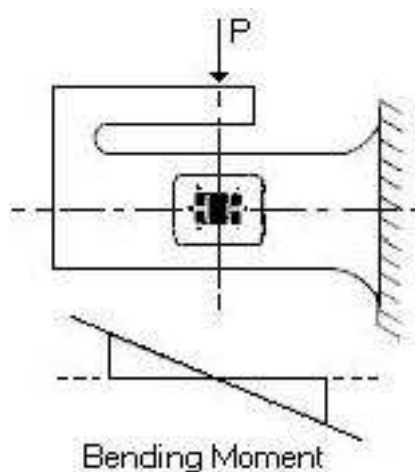


Fig. 1.15 - Spring element shear-web con momento flettente nullo nella sezione dell'estensimetro

Le celle di carico a taglio di bassa capacità sono molto difficili da produrre perché richiedono uno spessore dello strato centrale molto sottile al fine di ottenere i livelli di tensione necessari. Le celle a taglio di alta capacità sono, solitamente, basate sul doppio shear-web in configurazione tipo travi, essendo queste ultime costose e scomode da montare singolarmente.

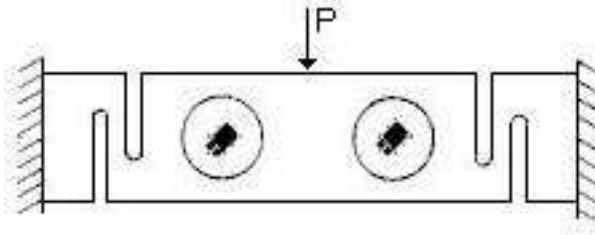


Fig. 1.16 - Doppio shear-web in configurazione tipo trave realizzato in modo da eliminare gli effetti dei carichi fuori asse e di quelli laterali

Tali tipi di celle sono, come già detto in precedenza, relativamente insensibili al punto di applicazione del carico e offrono una buona resistenza ai carichi laterali. Ciò ne semplifica l'uso in molte applicazioni di pesatura.

Le capacità di sovraccarico sono solitamente leggermente superiori se confrontate con quelle delle travi sottoposte a flessione, nonostante le interruzioni meccaniche risultino meno fattibili a causa della deflessione molto ridotta.

1.5.2.3 Celle di carico a compressione

Le celle di carico a compressione possono essere del tipo a taglio, a flessione, a torsione ad anello o a colonna. La cella a colonna ha alle spalle una storia che risale ai primi trasduttori con estensimetri. Come indicato di seguito, l'elemento a colonna consiste di uno (colonna singola) o più elementi (colonne multiple).

Sebbene sia concettualmente semplice, l'elemento a colonna ha un numero di caratteristiche specifiche che rendono questo tipo di cella difficile da progettare e da produrre. La colonna dovrebbe essere abbastanza lunga, nel rispetto della sezione trasversale, da produrre uno stato tensionale uniforme, non influenzato dalle condizioni sui bordi. Essendo la configurazione della colonna soggetta a effetti di secondo ordine causati da componenti di carico disassati e decentrati, bisogna prendere provvedimenti al fine di minimizzare tali effetti, per esempio usando due diaframmi sull'estremità superiore della colonna.

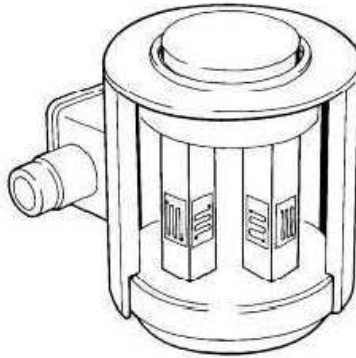


Fig. 1.17 - Esempio di cella a doppia colonna

Le celle di carico a colonna sono intrinsecamente non lineari a causa della variazione della sezione trasversale causata dalla deformazione sotto carico (modulo di contrazione trasversale o di Poisson). Questa non linearità può essere compensata con estensimetri semiconduttori, connessi in linea di eccitazione più e meno. L'output degli estensimetri semiconduttori serve quindi come feedback per la correzione del voltaggio del ponte in senso opposto rispetto a quello dell'errore causato dalla non linearità.

Quando sono progettate per carichi molto elevati, tali tipi di celle risultano alte e difficili da maneggiare (pesanti). Celle di minore profilo possono essere ottenute distribuendo il carico su tre o più colonne, ognuna delle quali possiede il proprio set di estensimetri. Questi ultimi, corrispondenti alle singole colonne, sono collegati in serie sui rami di un ponte di Wheatstone. Il risultato non è solo la complessiva diminuzione di ingombro ma anche migliorate performance quando la cella si trova sotto l'effetto di carichi decentrati o fuori asse.

Le celle a compressione non risentono del momento che solitamente è presente nelle travi. Le capacità di sovraccarico massimo sono altresì eccellenti. Tuttavia la deflessione relativamente piccola rende tali tipi di celle più sensibili ai carichi impulsivi.

1.5.2.4 Celle di carico a torsione ad anello

La misura della torsione ad anello è una applicazione relativamente nuova e idealmente adattabile ad un'ampia gamma di capacità, normalmente soggette a taglio e a momento flettente. Tali tipi di celle hanno un basso profilo e sono costruite in acciaio inossidabile e basate su circuiti a ponte intero di quattro estensimetri circolari. Tali estensimetri sono collegati ad una parte della cella avente forma di anello che si flette quando viene applicato il carico. Questa operazione provocherà una diminuzione del diametro dell'anello nella parte superiore e un aumento dello stesso nella parte inferiore. Quindi, quando l'unità viene caricata, due estensimetri si trovano in compressione e gli altri due in tensione.

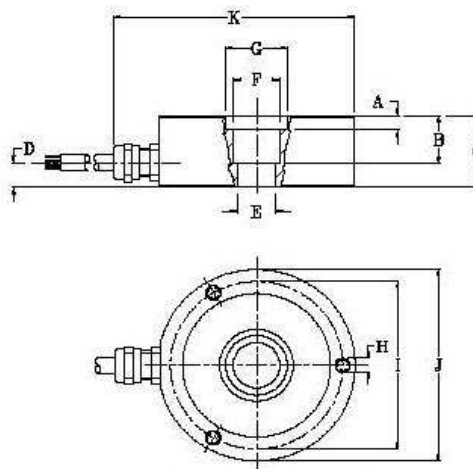


Fig. 1.18 - Schema costruttivo di cella di carico a torsione ad anello

Tab. 1.2 - Caratteristiche di capacità in funzione delle dimensioni riferite allo schema costruttivo delle celle di carico a torsione ad anello

Capacity(t)	0.25, 0.5, 1	2, 3.5, 5	10
A	1.0	6.0	-
B	15.0	20.0	14.8
C	25.0	30.0	35.0
D	9.5	8.5	10.0
E	M10	15 H7	ø24.9
F	ø 19	ø 19	ø29.1
G	ø25	ø25	-
H	M6 (3x120*) 8 Deep		
I	ø 70	ø 70	ø83
J	ø80	ø80	ø95
K	97.5	97.5	112.5

Attention:

Dimensions: mm.

All dimension tolerances according to ISO 2768m,
unless otherwise specified.

La forma geometrica dell'elemento sensibile fornisce prestazioni migliorate in termini di misurazione del creep e dell'isteresi rispetto al taglio e alla flessione.

A causa della modalità di funzionamento in compressione, l'unità non risente del momento tipicamente presente nelle travi ed è pertanto un dispositivo maggiormente sicuro, pur mantenendo un profilo estremamente basso. La protezione da sovraccarico di tipo meccanico è garantita da una distanza prefissata tra l'anello, sul quale viene introdotto il carico, e la piastra di base sottostante. Tali tipi di celle di carico hanno una deflessione molto ridotta, cosa che le rende particolarmente adatte ad applicazioni a velocità elevate, ma risultano altresì molto sensibili ai sovraccarichi di tipo impulsivo.

1.5.3 Fattori legati alla scelta delle celle di carico

Questo paragrafo prende in considerazione i fattori da valutare quando si vanno a specificare il numero, il tipo e il range di carico di una cella per una particolare applicazione. La scelta della cella sarà influenzata da considerazioni sia di carattere ingegneristico ed economico che dal rapporto fornitore-cliente. Dove possibile le specifiche dovrebbero essere sufficientemente flessibili per permettere la scelta tra proposte alternative là dove queste siano giustificate.

1.5.3.1 Numero di celle di carico

Ogni numero di celle può, in teoria, essere usato per sorreggere l'elemento sottoposto al carico. Il numero delle celle da usare dipende da uno o più dei seguenti fattori:

- ◆ la configurazione e il progetto meccanico dell'elemento e della struttura sottoposti a carico. Ciò implica che bisogna tenere conto della resistenza strutturale complessiva dei vari componenti caricati, che hanno una notevole varietà di disegni, di caratteristiche economiche e di sicurezza e che, insieme, conducono ad un'unica proposta che sarà poi integrata nella configurazione generale dell'impianto;
- ◆ la stabilità dell'elemento che riceve il carico. Questa aumenterà contemporaneamente all'area del supporto. Ciò potrebbe essere rilevante, per esempio, per sistemi situati all'aperto e soggetti a carico dovuto al vento;
- ◆ la ripartizione uniforme del carico tra le celle è, generalmente, tanto più difficile da ottenere quanto più aumenta il numero dei supporti. Per questo motivo sistemi che usano più di quattro celle sono relativamente rari, tranne che in strutture complesse, molto ingombranti e pesanti.

1.5.3.2 Capacità e accuratezza della cella di carico

Le celle di carico sono realizzate in range di capacità definiti, ognuno avente una certa classe di carico, normalmente avente una capacità di sovraccarico massima stabilita. Il range selezionato sarà frutto sia della relazione esistente tra i dettagli del carico normale e sovraccarico contenuti nelle specifiche sia alla luce delle esperienze del fornitore e dell'utente.

L'approccio di base è quello di considerare i carichi totali massimi e dividerli per il numero di punti di supporto e poi selezionare il range immediatamente superiore tra quelli disponibili. Tale approccio, molto semplicistico, può essere arricchito e modificato dai seguenti fattori:

- a) Ripartizione insufficiente del carico in un sistema a celle multiple.

- b) Carico disomogeneo, introdotto sia dal progetto dell'elemento della cella che sorregge il carico, sia dalla distribuzione degli elementi presenti nella cella stessa.
- c) Situazioni e condizioni di carico superiori alla norma introdotti dall'ambiente operativo come, ad esempio, carichi dovuti al vento, shock, impatti o vibrazioni. Sarebbe cosa opportuna prendere in considerazione anche i possibili sovraccarichi dovuti all'eccessivo riempimento degli elementi caricati.
- d) Condizioni di carico eccessivo provocate da procedure di pulizia, manutenzione o abuso fisico.
- e) Le necessità di ottimizzare le performance richieste costringono la cella ad operare deliberatamente nella regione di sicurezza da sovraccarico.
- f) Costi. La decisione finale può essere influenzata non solo dal costo dei componenti ma anche dalla compatibilità con quelli preesistenti e dal rispetto delle disponibilità economiche.

Le celle di carico vengono raggruppate, in accordo con le loro possibilità di performance complessive, in diverse classi di accuratezza. Alcune di queste classi sono collegate a standards che sono usati in ambito legale per i sistemi di pesatura mentre altre vengono definite dal costruttore della particolare cella. In funzione dello standard e delle performance del particolare tipo di cella viene assegnato un codice alfanumerico detto "grado di accuratezza" (accuracy grade).

Tab. 1.3 - Classi di accuratezza delle celle di carico commerciali

	Class A	Class B	Class C	Class D
Lower limit	50 000	5 000	500	100
Upper limit	Unlimited	100 000	10 000	1 000

La parte alfabetica si riferisce alla specifica classe di accuratezza, mentre la parte numerica si riferisce al numero di divisioni. I codici delle specifiche sono dettati dalla NTEP (National Type Evaluation Program) e dall'OIML (International Organization of Legal Metrology). Alcuni esempi sono:

- Az^2 : il prodotto rispetta i requisiti dettati dalla NTEP per applicazioni di classe III.
- Bz : il prodotto rispetta i requisiti dettati dalla NTEP per applicazioni di classe III.
- Cz : il prodotto rispetta i requisiti dettati dalla OIML per applicazioni di classe III e III.

² La "z" rappresenta il numero di divisioni (x1000), ad esempio A3,B10,C6, etc.

- CC/D3 : questa è una classificazione arbitraria della casa costruttrice non valida per applicazioni commerciali.

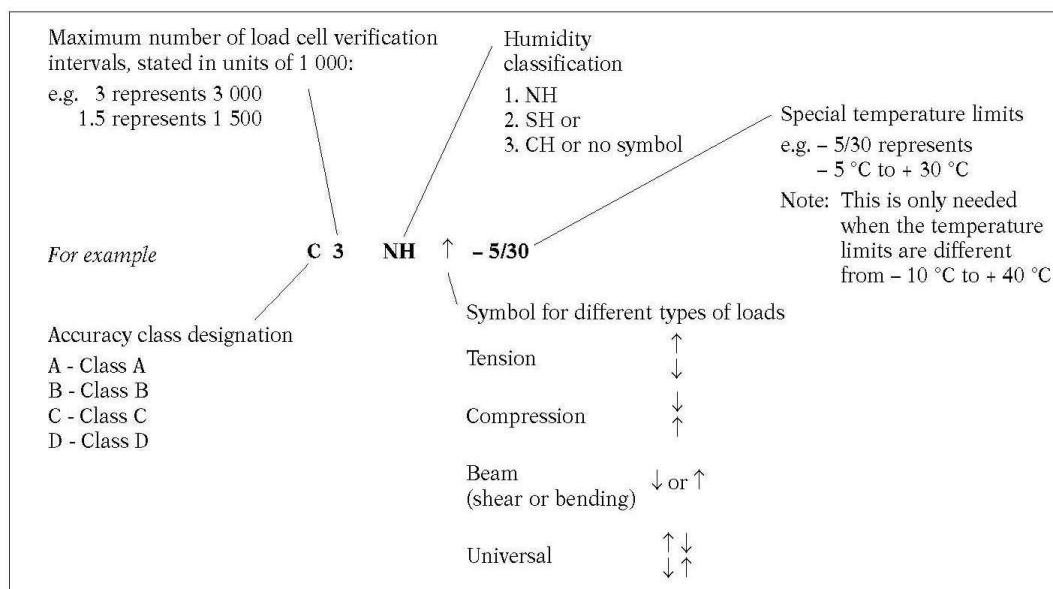


Fig. 1.19 - Simbologia di classificazione delle celle di carico in commercio

Molti sistemi usano celle di carico nella zona dove il range di misura o di funzionamento è ben al di sotto della loro capacità dichiarata. In questi casi assumono una importanza rilevante i valori di “utilizzo” e “intervallo minimo di verifica” (v_{min}).

L’intervallo di verifica minimo è definito come il più piccolo valore di una quantità (massa) che potrebbe essere applicato alla cella di carico senza superare il massimo errore permissibile (mpe). Quest’ultimo è definito come E_{max}/γ , dove E_{max} rappresenta la capacità dichiarata della cella e γ rappresenta un valore definito dal costruttore della cella.

Tab. 1.4 - Massimo errore permissibile in funzione della classe di accuratezza e del carico previsto

mpe	Load, m			
	Class A	Class B	Class C	Class D
$P_{LC} \times 0.5 \text{ v}$	$0 \leq m \leq 50\,000 \text{ v}$	$0 \leq m \leq 5\,000 \text{ v}$	$0 \leq m \leq 500 \text{ v}$	$0 \leq m \leq 50 \text{ v}$
$P_{LC} \times 1.0 \text{ v}$	$50\,000 \text{ v} < m \leq 200\,000 \text{ v}$	$5\,000 \text{ v} < m \leq 20\,000 \text{ v}$	$500 \text{ v} < m \leq 2\,000 \text{ v}$	$50 \text{ v} < m \leq 200 \text{ v}$
$P_{LC} \times 1.5 \text{ v}$	$200\,000 \text{ v} < m$	$20\,000 \text{ v} < m \leq 100\,000 \text{ v}$	$2\,000 \text{ v} < m \leq 10\,000 \text{ v}$	$200 \text{ v} < m \leq 1\,000 \text{ v}$

Il minimo range di misura si può applicare ad ogni punto del range di misura complessivo tra il minimo carico fisso (E_{\min}) e la capacità dichiarata (E_{\max}).

Una cella di carico può comunque essere utilizzata in un range superiore rispetto a quello di utilizzo minimo.

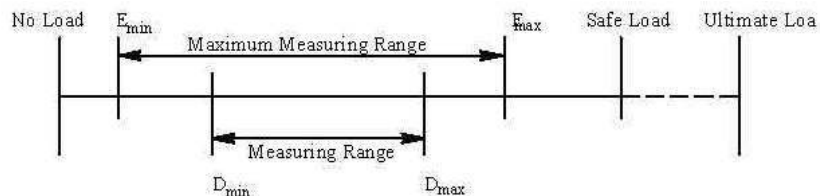


Fig. 1.20 - Relazione grafica dei vari termini di carico

I termini al di sopra della linea orizzontale centrale sono determinati dal disegno progettuale della cella, mentre i termini al di sotto vengono stabiliti dalle condizioni di utilizzo e dalle performance della cella.

1.6 Voltmetri e multimetri digitali (DVM e DMM)

I voltmetri digitali (DVM) ed i multimetri digitali (DMM) presentano all'uscita, sotto forma numerica, il risultato di misure, rispettivamente, di tensione (DVM) ed anche di altre grandezze elettriche (DMM), quali tensioni e correnti alternate, resistenza, temperatura, ecc. In quest'ultimo caso, gli stadi di condizionamento del segnale all'ingresso degli strumenti producono all'uscita una tensione continua proporzionale al valore della grandezza da misurare. Questa tensione viene quindi convertita in forma digitale attraverso un processo di discretizzazione in un certo numero di livelli. Il risultato viene codificato e infine presentato sotto forma decimale su un visualizzatore (*display*), oppure inviato a una uscita digitale di tipo elettrico.



Fig. 1.21 - Alcuni esempi di multimetri digitali

L'impiego dei DVM e dei DMM è andato via via crescendo in questi ultimi anni in parallelo all'estensione dell'uso della strumentazione automatica, programmabile e con uscita numerica, perché quest'ultima può essere trasferita facilmente a sistemi di acquisizione dati per successive elaborazioni delle varie informazioni di misura fornite da molti e differenti strumenti. I risultati dell'elaborazione possono anche essere utilizzati per il controllo dei processi di produzione. Infatti i DVM e i DMM offrono una felice combinazione di velocità e accuratezza di misura. A seconda delle necessità sono richiesti DMM con elevata accuratezza e quindi con moderata velocità di misura, oppure con elevate o addirittura elevatissime velocità di lettura e di conseguenza con ridotte accuratèzze. Differenti combinazioni si possono trovare anche in un solo strumento, naturalmente del tipo più sofisticato, lasciando la scelta della combinazione migliore all'utilizzatore.

I voltmetri digitali in commercio differiscono per numero di campi di misura, numero di cifre, accuratezza, velocità di lettura, reiezione del rumore di modo differenziale (normale) e comune, uscite digitali di vario tipo. Il campo di misura di base della maggior parte dei DVM è di $1V$ o di $10V$ ma con un opportuno preamplificatore possono anche essere effettuate misure nell'intorno di $0.1 \mu V$. I voltmetri digitali di miglior qualità sono in grado di misurare tensioni continue comprese tra $10 nV$ e $1000 V$.

L'accuratezza è proporzionata alla risoluzione (uno strumento a tre cifre difficilmente può offrire una precisione migliore di $\pm 0.1\%$ essendo questa la risoluzione base dello strumento stesso).

La velocità massima di lettura è correlata al periodo di digitalizzazione: un DVM in grado di digitalizzare in $1 ms$ permette circa 1000 letture al secondo.

1.6.1 Schema di un multimetro

La fig. 1.22 mostra lo schema dei collegamenti per un multimetro. L'ingresso del multimetro dispone di una serie di morsetti che un commutatore collega, secondo la misura desiderata, con i blocchi di condizionamento del segnale (nei multimetri di basso costo si collegano direttamente al circuito esterno i morsetti interessati). Il tipo di impedenza presente ai morsetti interessati è tale da ridurre al minimo l'influenza sul circuito esterno quando lo strumento viene inserito.

Per questo esempio di multimetro sono disponibili in totale 4 morsetti di ingresso. Il morsetto numero 2, indicato con lettera L (*low*) costituisce un riferimento (terra) per misure di tensione e corrente. Se si desidera utilizzare lo strumento come voltmetro, la tensione incognita deve essere applicata fra i morsetti H e L (1 e 2 di fig. 1.22), dove il morsetto L viene preso come riferimento. Per le misure di corrente in continua e in alternata sono previsti i

morsetti 2 (L) e 3 (10 A) o 3' (100mA). Per le misure di resistenza il resistore incognito viene connesso ai morsetti H e L.

Tanto i voltmetri quanto i multimetri digitali posseggono una serie di automatismi sia di funzionamento sia di indicazioni:

- indicazione di polarità (+,-);
- cambio di scala e indicazione con corrispondente posizionamento della virgola e dell'unità di misura in funzione di un conveniente fondo scala;
- azzeramento con determinazione e/o compensazione delle tensioni di *offset*.

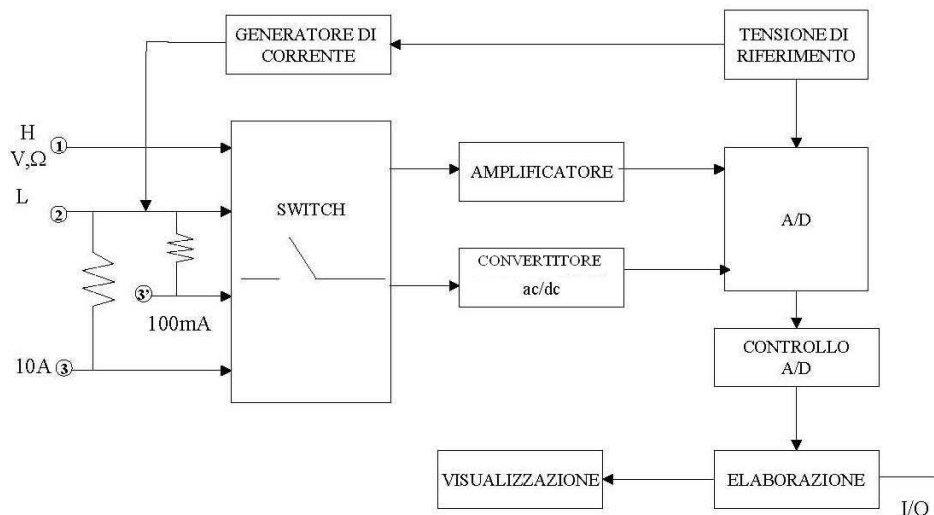


Fig. 1.22 - Schema a blocchi di un multimetro

1.6.2 Misure di tensioni continue ed alternate

Se la grandezza da misurare è una tensione continua, i circuiti di condizionamento da premettere al convertitore hanno solo lo scopo di rendere il valore incognito adatto a essere applicato al successivo blocco di conversione. Si tratta quindi di attenuatori e di amplificatori selezionabili manualmente dall'operatore o automaticamente dallo strumento. Usualmente il campo di tensioni misurabili si estende, a seconda del tipo di strumento, da parecchie centinaia di volt ad alcuni millivolt o microvolt. Inoltre, tale campo è generalmente suddiviso in sottoinsiemi parzialmente sovrapposti, ognuno dei quali è individuato da un valore numerico corrispondente approssimativamente al valore massimo relativo a quel sottoinsieme e spesso indicato con il nome convenzionale di portata.

Per i segnali in a.c. lo schema prevede l'impiego di un convertitore analogico (AC/DC) prima della conversione A/D. In alternativa al convertitore analogico si può avere un sistema con campionatore e quantizzatore.

1.6.3 Misurazione di correnti continue e alternate

Un multimetro è in grado di misurare anche correnti, sia continue, sia alternate. In questo caso lo strumento va inserito nel circuito utilizzando i morsetti, uno dei due indicati con A, e considerando L come morsetto di uscita per la corrente.

Per eseguire una misurazione di corrente, è necessario predisporre lo strumento agendo sugli opportuni tasti posti sul pannello frontale. La corrente incognita viene fatta passare per una resistenza nota, interna allo strumento, ai capi della quale si manifesta una differenza di potenziale che viene misurata:

$$V = RI \quad (33)$$

Per poter avere portate di corrente significativamente diverse, è necessario avere differenti morsetti caratterizzati da resistenze differenti (R23 o R23').

Grazie alla resistenza nota si è ottenuta una trasduzione della corrente in una tensione e quindi le misure in continua ed in alternata vengono eseguite come visto al paragrafo precedente.

1.6.4 Misurazione di resistenze

Un multimetro consente anche la misurazione di resistenze. A tale scopo, nella resistenza incognita viene fatta circolare una corrente nota e viene quindi misurata la c.d.t. così prodotta. La conoscenza della corrente è spesso ottenuta valutando la c.d.t. che si genera quando tale corrente circola in una resistenza nota. La misurazione di una resistenza si traduce quindi nella misurazione di due tensioni e nella successiva elaborazione dei risultati. Normalmente la resistenza incognita viene posta tra gli stessi morsetti H ed L utilizzati per la misurazione di tensione; lo strumento viene poi predisposto agendo sui tasti posti sul pannello frontale, o mediante programmazione.

Negli strumenti con capacità di autorange, una prima misurazione consente di valutare il valore più opportuno dell'intensità di corrente da erogare al fine di eseguire la misurazione successiva nelle migliori condizioni strumentali.

Particolari cautele devono essere prese quando la resistenza incognita assume valori prossimi agli estremi del campo di misura dello strumento, il quale si può estendere dai $\mu \Omega$ ai $G\Omega$.

Quando vengono misurate resistenze molto piccole, oppure si richiedono risoluzioni elevate, la misurazione avviene in due fasi distinte. In una prima fase viene valutata la c.d.t. causata dalla corrente fornita dallo strumento ai capi della

resistenza incognita; nella seconda fase, invece, la stessa c.d.t. viene misurata in assenza di corrente fornita dallo strumento; tale valore viene sottratto da quello ottenuto nella prima fase prima di valutare il valore della resistenza in esame. Questo procedimento si rende necessario quando eventuali sorgenti di tensione di disturbo che si generano, ad esempio, nel contatto tra metalli diversi posti a temperatura diversa, assumono valori non trascurabili. La necessità di questi accorgimenti dipende sia dal valore della resistenza incognita, sia dal numero di cifre, e quindi dalla risoluzione, con cui essa deve essere misurata.

Per estendere superiormente il campo dei valori massimi misurabili, invece, lo strumento pone in parallelo alla resistenza incognita una resistenza nota. In tal modo la c.d.t. assume valori accettabili anche utilizzando correnti non troppo piccole, e quindi valutabili in modo accurato. Il valore misurato viene poi corretto secondo la relazione:

$$R_x = \frac{R_N \cdot R_M}{R_N - R_M}, \quad (34)$$

dove R_N rappresenta la resistenza nota posta in parallelo e R_M il risultato della misurazione.

Questa correzione viene eseguita sfruttando la capacità elaborativa sempre presente negli attuali DMM; il risultato visualizzato fornisce pertanto direttamente il valore di R_x . Questo metodo permette di misurare resistenze fino a valori dell'ordine del $G\Omega$.

Alcuni multimetri prevedono anche la possibilità di eseguire semplici elaborazioni sui risultati della misurazione; le potenzialità di elaborazione offerte sono ovviamente molto influenzate dal tipo di strumento. Ad esempio è possibile eseguire la differenza tra due valori misurati; questa operazione è utile quando interessa lo scostamento di una grandezza rispetto a un opportuno valore di riferimento. E' anche possibile eseguire la media di un numero di misure prefissato dall'operatore; può essere inoltre fornito anche lo scarto quadratico medio, o altri parametri utili per la descrizione statistica dei risultati. Quando è utilizzata correttamente, questa procedura può aumentare notevolmente l'accuratezza del risultato. E' possibile anche fissare il campo di valori entro cui deve essere contenuto il risultato; con questa modalità di funzionamento, lo strumento segnala automaticamente quando il valore misurato esce da tale campo. Questa funzione può risultare molto utile in sistemi di misurazione automatici. In qualche caso il valore misurato viene espresso con modalità diverse da quelle convenzionali, ad esempio in dB rispetto a un valore di riferimento. L'unità di misura può comunque essere scelta dall'operatore.

1.6.5 La risoluzione negli strumenti digitali

La risoluzione di un metodo di misura o di uno strumento è in generale la capacità di distinguere o separare stati diversi del misurando. Nella

strumentazione digitale, la risoluzione della singola misura trova pertanto la sua definizione limite nella separazione dei livelli discreti.

Con riferimento alla singola misura e alla strumentazione digitale si può parlare di una risoluzione dimensionale (Δ) e di una risoluzione adimensionale (δ).

La risoluzione dimensionale (Δ) è la minima variazione della grandezza incognita che può essere rilevata in definite condizioni di lavoro ed è quindi funzione della modalità di impiego dello strumento. In pratica, la risoluzione dimensionale è direttamente legata al peso dell'ultima cifra della lettura visualizzabile dallo strumento nelle particolari modalità di funzionamento e nelle condizioni operative fissate. Ad esempio, se la lettura è 12.432 V, la risoluzione con cui è stata ottenuta la misura è 1 mV, dato che l'ultima cifra della lettura (il 2) occupa la posizione riservata ai 10-3V.

Normalmente, i manuali degli strumenti riportano, per le diverse modalità e condizioni di funzionamento, il valore della risoluzione.

Un altro parametro per caratterizzare la risoluzione dello strumento è la risoluzione adimensionale δ esprimibile esclusivamente attraverso N_{max} , e più precisamente tramite il numero di cifre utilizzato specificando la base numerica impiegata B. Pertanto avremo:

$$\delta = \log_B N_{max}. \quad (35)$$

δ in generale non è un intero; è intero soltanto se $N_{max} = B^{N_c}$ dove N_c è il numero massimo di cifre disponibili ed N_{max} coincide col numero massimo rappresentabile.

Quando δ non è un intero il valore utilizzato è quello approssimato al quarto di unità. In questo caso evidentemente il valore di δ è puramente indicativo: ad esempio $\delta = 4 \frac{1}{2}$ significa che si hanno a disposizione 5 cifre decimali, ma non sono rappresentabili tutti i valori compresi tra 0 e 99999, in particolare il valore massimo di tensione in questo caso potrebbe essere 1.9999V o un altro valore ancora. Si noti che la risoluzione dimensionale, invece, non è ambigua, essendo determinabile dal peso della cifra meno significativa, e nell'esempio (per una lettura minore di 1.9999V, ad esempio 1.2275V) vale 100 μ V.

1.6.6 Valutazione dell'accuratezza della misura fornita da un multimetro digitale

Non esiste una normativa precisa per specificare l'accuratezza di un multimetro; in generale, quindi, il confronto tra dati forniti da costruttori diversi non è semplice.

Di solito l'accuratezza assoluta di un multimetro viene fornita mediante una relazione del tipo:

$$\Delta_x = k_1 \cdot |X| + k_2 \cdot \Delta, \quad (36)$$

dove k_1 rappresenta l'aliquota percentuale dell'incertezza dipendente dal valore misurato X , mentre k_2 quella che dipende solamente dalla portata scelta. I valori di k_1 e di k_2 sono riportati in apposite tabelle fornite dal costruttore.

E' bene inoltre notare che, nella precedente relazione, il misurando può essere una qualsiasi delle grandezze misurabili dallo strumento, ossia, una tensione o una corrente continua o alternata, oppure una resistenza.

La risoluzione relativa vale:

$$\Gamma_x = \frac{\Delta_x}{X} = k_1 + k_2 \cdot \Delta, \quad (37)$$

la quale è costituita dalla somma di un termine non dipendente dal valore misurato e di un termine che può diventare prevalente quando X è prossimo al valore minimo del campo di ingresso selezionato (*downrange*). L'effetto di queste due componenti sull'incertezza relativa è illustrato in fig. 1.23. Quindi è preferibile, quando possibile, eseguire le misurazioni in prossimità del fondo scala. Un uso corretto dello strumento richiede quindi di utilizzare la minima portata compatibile con il valore assunto dal misurando; negli strumenti provvisti di capacità di autorange, in particolare, la selezione della portata più conveniente viene eseguita in modo automatico.

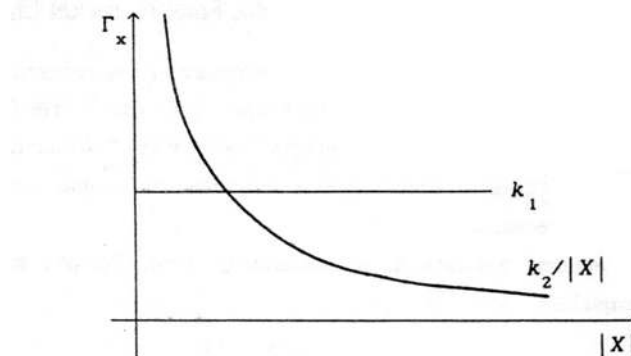


Fig. 1.23 – Dipendenza qualitativa della incertezza relativa da k_1 e k_2

Dalla figura si evidenzia l'influenza delle due componenti dell'incertezza sul valore dell'incertezza relativa.

E' importante notare che, affinché i valori delle due componenti dell'incertezza riportati sulle tabelle fornite dal costruttore siano validi, devono essere verificate alcune condizioni. In caso contrario, infatti, l'entità dell'incertezza deve essere sicuramente aumentata, talvolta anche in modo notevole. In particolare, poichè la validità dei dati forniti dallo strumento si degrada nel tempo, un voltmetro digitale deve essere messo a punto periodicamente seguendo una procedura specificata dettagliatamente dal costruttore; la messa a punto deve inoltre essere eseguita in un certo campo di

valori della temperatura ambiente. Assieme ai valori k_1 e k_2 delle due componenti dell'incertezza vengono quindi forniti sia lo scostamento ammissibile tra la temperatura ambiente e quella alla quale è stata eseguita la messa a punto, sia la durata della validità di tale operazione. Se la temperatura ambiente non rientra nel campo previsto, i valori dei parametri k_1 e k_2 possono essere corretti utilizzando dei coefficienti forniti dal costruttore.

Si deve inoltre ricordare che, a causa delle inevitabili tensioni di *offset*, lo strumento può fornire una indicazione non nulla anche quando il valore del misurando è nullo. L'effetto di tali tensioni sul valore della misura può però essere valutato, e quindi successivamente corretto, eseguendo una misurazione con ingresso nullo. Poiché tale modo di procedere riduce la velocità della misurazione, l'operatore può generalmente scegliere se eseguire o meno questa procedura; tale scelta avviene mediante un comando spesso denominato autozero (

$\frac{on}{off}$). E' da sottolineare che il valore del parametro K corrispondente all'opzione autozero off è maggiore di quello corrispondente all'opzione autozero on, come si può verificare nelle tabelle fornite dal costruttore.

Un altro parametro molto utile fornito nelle specifiche è il tempo di misurazione. Normalmente tale tempo è funzione della frequenza della tensione di alimentazione e del numero di cifre utilizzate. Questo consente, come in precedenza dimostrato, di ridurre l'influenza del *ripple*³ sovrapposto alla tensione con cui vengono alimentati i vari blocchi che compongono lo strumento.

1.7 Amplificatori

L'amplificatore operazionale (AO) è un circuito integrato costituito da una rete di resistenze, capacità, diodi e transistori incapsulati in unico contenitore di plastica o di metallo, che viene collegato normalmente al circuito mediante una zoccolatura a pressione. Esso può essere definito funzionalmente come un amplificatore differenziale, cioè un dispositivo attivo a tre terminali che genera al terminale di uscita una tensione proporzionale alla differenza di tensione fornite ai due terminali di ingresso.

Buona parte dei circuiti elettronici è costituita da componenti integrati, composti ciascuno da numerosi elementi attivi e passivi miniaturizzati, e nei circuiti analogici questi integrati sono quasi tutti amplificatori operazionali.

³ Nei diodi raddrizzatori se la corrente è elevata si osserva che la tensione V_o d'uscita non è più perfettamente una linea costante come una vera tensione continua ma assume un andamento ondulatorio e cioè è come se si avesse una V_{om} (tensione d'uscita media) con sovrapposta una tensione alternata di ampiezza picco pari a V_r . Questa tensione prende il nome di "residuo di alternata" o dall'inglese tensione di "*ripple*".

L'Amplificatore operazionale (A.O.) è essenzialmente un amplificatore di tensione avente le seguenti caratteristiche che verranno meglio definite nel paragrafo successivo:

- alto guadagno;
- ingresso differenziale;
- alta impedenza di ingresso e bassa impedenza di uscita
- basse derivate termiche
- elevata dinamica d'ingresso per il modo comune
- bassa cifra di rumore (*noise figure*)
- elevata impedenza differenziale d'ingresso
- minima amplificazione di modo comune, quindi massima CMRR
- alta amplificazione differenziale
- elevata slew rate
- bassissima impedenza d'uscita
- tensione d'uscita nominale di 0 volt
- elevata dinamica d'uscita
- alto rendimento di potenza
- larga banda passante dalla continua fino a valori di 1-100 MHz dove l'amplificatore presenterà guadagno unitario.

Il simbolo grafico, comunemente utilizzato, per rappresentare l'A.O. è il seguente:

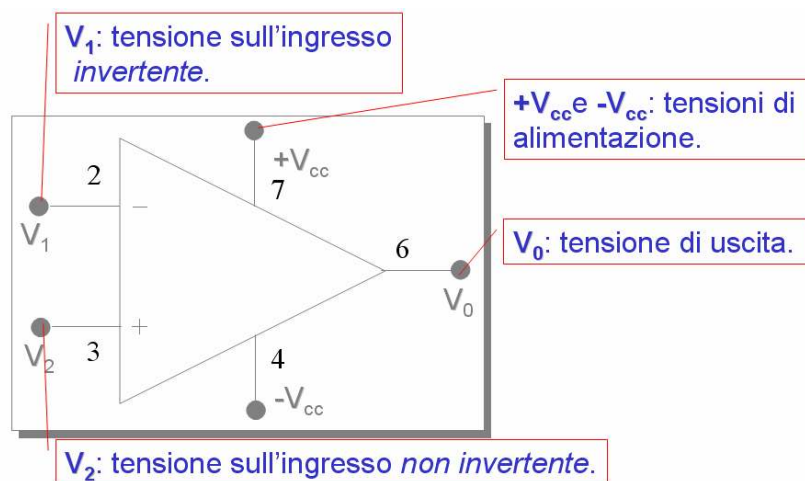


Fig. 1.24 - Schema grafico di un amplificatore operazionale

Una prima configurazione elementare è l'**amplificatore invertente** schematizzato in fig. 1.25.

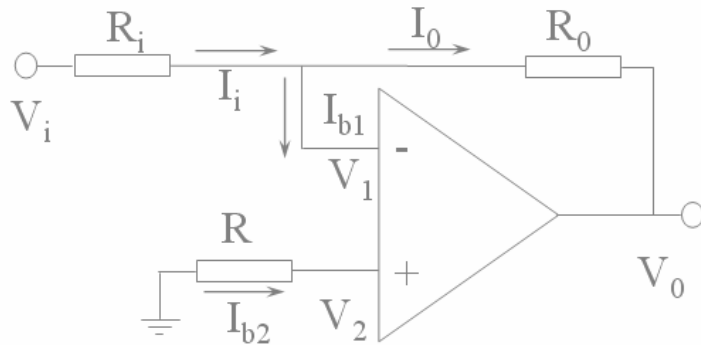


Fig. 1.25 - Schema di amplificatore operazionale invertente

L'amplificatore invertente, applicando un segnale in ingresso, lo amplifica di un fattore R_0/R_i , invertendone la fase di 180° :

$$V_0 = -\frac{R_0}{R_i} V_i \quad (38)$$

Ne deriva che il valore del Guadagno, non dipende da A, e quindi non varia con la frequenza, né con il tipo di A.O. utilizzato; esso è determinato esclusivamente dai valori di R_0 e R_i .

Una seconda configurazione elementare è **l'amplificatore non invertente** ed il suo schema è riportato in fig. 1.26.

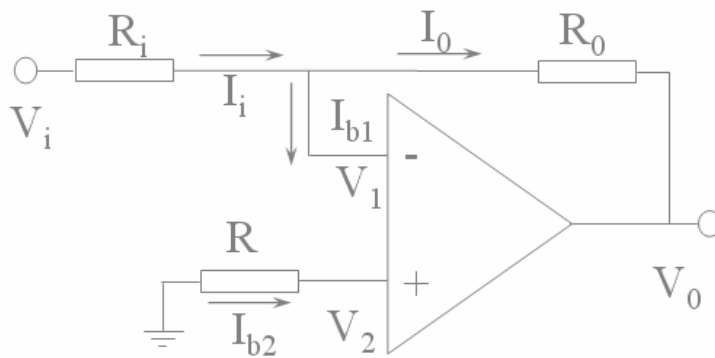


Fig. 1.26 - Schema di amplificatore non invertente.

L'uscita dell'amplificatore non invertente dipende dall'ingresso, in base alla seguente relazione:

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_0}{R_i}\right) \cdot V_i \quad (39)$$

Anche nel non invertente, come nell'invertente, il guadagno è indipendente da A , poiché A è abbastanza grande, ed è determinato solo dai valori usati per la rete di reazione. Questo risultato, comune a tutti i circuiti con retroazione negativa, rende il circuito insensibile ai componenti attivi.

L'amplificatore differenziale può essere realizzato utilizzando i transistor bipolari BJT, oppure i FET, oppure un solo circuito integrato in cui è presente uno o più amplificatori differenziali.

Gli amplificatori vengono generalmente classificati:

- ◇ Secondo la selettività: aperiodici a banda larga o limitata e selettivi.
- ◇ Secondo il campo di applicazione: radiofrequenza e banda base, videofrequenza e audiofrequenza.
- ◇ Secondo il modo di funzionamento: classe A, classe A/B, classe B, classe C, classe D.
- ◇ Amplificatori di tensione: utilizzati per elevare il livello della tensione applicata all'ingresso, per esempio l'uscita microfonica.
- ◇ Amplificatori di potenza: utilizzati quando l'impedenza di carico applicata ai terminali dell'amplificatore assorbe delle correnti relativamente elevate, per esempio un carico come l'altoparlante.

1.7.1 Un caso particolare: inseguitore di tensione o buffer a guadagno unitario

Il circuito di fig. 1.27 mostra l'utilizzo dell'operazionale come "buffer". Col termine "buffer" si intende un circuito che svolge una funzione di separazione o di adattamento. Nel caso specifico, il circuito, che è una particolare configurazione non invertente, presenta la più alta impedenza d'ingresso ottenibile con gli amplificatori operazionali.

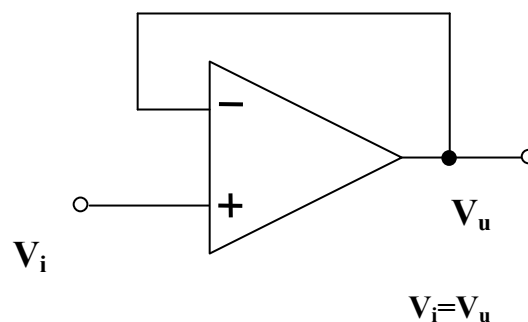


Fig. 1.27 - Buffer a guadagno unitario

Tradotto in formula e considerando l'espressione matematica dell'amplificazione di tensione a vuoto, $A_{V\infty}$, che è :

$$A_{V\infty} = \frac{V_i}{V_u} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} , \quad (40)$$

con Z_1 e Z_2 impedenze di ingresso e di uscita, con $Z_1 = \infty$ e $Z_2 = 0$ si ha:

$$A_{V\infty} = 1. \quad (41)$$

Tale circuito fornisce, quindi, un guadagno pari a uno con un'impedenza di ingresso infinita e una impedenza di uscita nulla. Si ottiene così, quindi, una notevole trasformazione del livello di impedenza mantenendo inalterato il livello del segnale.

Il buffer a guadagno unitario è quindi utile in tutti i casi in cui la sorgente di segnale presenta una impedenza interna troppo elevata e non è in grado di erogare la corrente necessaria per pilotare il carico. Infatti l'ingresso del buffer non assorbe corrente mentre la sua uscita può pilotare un carico qualsiasi senza che si manifestino variazioni nel livello del segnale.

1.7.2 Parametri dell'amplificatore operazionale reale

I parametri dell'amplificatore operazionale reale sono:

- ❖ Guadagno in tensione: in un amplificatore reale la tensione di uscita dipende, oltre che dal segnale differenziale $V_d = V_2 - V_1$, anche dal segnale di modo comune, definito come:

$$V_c = \frac{1}{2} (V_2 + V_1) . \quad (42)$$

Si ha cioè:

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c , \quad (43)$$

dove A_d rappresenta il guadagno differenziale del dispositivo, mentre A_c è il guadagno di modo comune. A_d (indicato spesso con A_v oppure A) viene anche chiamato guadagno ad anello aperto dell'amplificatore operazionale e i suoi valori tipici sono $10^3 \div 10^7$.

- ❖ Guadagno di modo differenziale: Indichiamo con A_d il guadagno complessivo di modo differenziale, cioè:

$$A_d = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (44)$$

dove A_2 viene considerato in valore assoluto.

- ❖ Guadagno di modo comune: indichiamo con A_s il guadagno di modo comune, cioè:

$$A_s = A_1 + A_2 \quad (45)$$

dove A_2 viene considerato col suo segno negativo. Quindi, normalmente, essendo $A_1 = A_2$ si ottiene che $A_s = 0$.

- ❖ Rapporto di reiezione di modo comune: possiamo ora definire il rapporto di reiezione di modo comune, detto CMRR, come il rapporto tra:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_s} \quad (46)$$

Il rapporto di reiezione di modo comune indica la proprietà di un amplificatore differenziale di respingere il segnale che si presenta uguale ai due ingressi. Se consideriamo che il rumore o un disturbo che proviene dall'esterno, è un segnale che si presenta contemporaneamente ai due ingressi, possiamo ritenere che l'amplificatore differenziale è immune ai disturbi, vale a dire il disturbo viene respinto dall'amplificatore e quindi non passa in uscita.

- ❖ Larghezza di banda: questo parametro può essere definito in tre modi. Le tre definizioni più usate sono le seguenti:

- 1) Frequenza di taglio a 3dB (f_{3dB}): è la frequenza alla quale il guadagno ad anello aperto è 3dB al di sotto del suo valore massimo.
- 2) Frequenza di taglio per guadagno unitario (f_t): è la frequenza alla quale il guadagno è unitario ($A_{d/dB}=0$).
- 3) Larghezza di banda a piena potenza (f_{om}): è definita come la massima frequenza alla quale una forma d'onda sinusoidale della massima ampiezza possibile può essere osservata all'uscita del dispositivo senza che presenti distorsione.

- ❖ Slew Rate: è definito come il massimo valore che la pendenza della tensione di uscita può assumere (dv/dt).

Se all'ingresso di un amplificatore operazionale si invia un segnale sinusoidale di frequenza crescente, a partire da una certa frequenza, il segnale tenderà ad assumere forma triangolare. Questo tipo di distorsione è causato dalla presenza di capacità interne all'amplificatore (oppure esterne, di compensazione). La velocità di variazione della tensione ai capi di un condensatore è, infatti, uguale a :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{C} \quad (47)$$

E, in un amplificatore operazionale, le correnti disponibili sono limitate. Si ha, quindi:

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{\max} = \frac{i_{\max}}{C} = \rho \quad (48)$$

Il parametro ρ è appunto lo slew-rate (valori tipici :0,1 ÷ 1500 V/μsec.).

- ❖ Resistenza di ingresso. Normalmente vengono definite due resistenze di ingresso: R_{id} (tra i due terminali di ingresso), ed una di modo comune R_{ic} (da entrambi i terminali d'ingresso al terminale negativo di alimentazione).

R_{ic} ha per lo più valori superiori a 10^8 ohm. R_{id} può avere valori compresi tra alcune decine di Kohm e 10^{12} ohm.

- ❖ Resistenza di uscita: è la resistenza vista tra il terminale di uscita e massa. Ha valori tipici compresi tra 0,75 ohm e 1 Kohm.
- ❖ Corrente d'ingresso di polarizzazione: questo parametro (I_b , input bias current) è definito come il valore medio delle due correnti d'ingresso dell'amplificatore operazionale quando l'uscita è a tensione zero:

$$I_b = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2} . \quad (49)$$

I valori tipici sono: $1\mu A \div 1nA$.

- ❖ Corrente di ingresso di offset (I_{io}): è la differenza tra le correnti d'ingresso dell'amplificatore operazionale quando l'uscita è a tensione zero

$$I_{io} = I_{b1} - I_{b2} \quad (50)$$

Con valori tipici di $0,05 \div 100 nA$.

- ❖ Tensione di ingresso di offset (V_{io}). È la tensione richiesta tra i due terminali d'ingresso dell'amplificatore perché l'uscita non sia nulla. I suoi valori tipici sono $0,1 \div 10 mV$.
- ❖ Coefficiente di temperatura della tensione di ingresso di offset. Questo coefficiente, il cui significato è evidente, ha valori compresi tra $1\mu V/^{\circ}C$ e $10 \mu V/^{\circ}C$.
- ❖ Deriva termica: è un parametro che riguarda le caratteristiche del quarzo, materiale usato nei circuiti che devono generare una frequenza molto precisa. Essa è generalmente compresa tra 0,1 e 1ppm/ $^{\circ}C$, e si riferisce allo scostamento massimo del valore di frequenza, rispetto al valore nominale stampato sul corpo, in conseguenza di uno scostamento di $\pm 1^{\circ}C$, fermo restando tale variazione all'interno della temperatura di lavoro che è generalmente compresa tra $-10^{\circ}C$ e $+70^{\circ}C$. Quindi, la frequenza di un quarzo con una deriva termica di 0,5ppm/ $^{\circ}C$ (ossia 0,00005%), potrà variare dello $\pm 0,00005\%$, per ogni grado di variazione della temperatura. A volte il valore di deriva termica viene indicato in ppm, anzichè in ppm/ $^{\circ}C$, e in questo caso si riferisce allo scostamento massimo del valore di frequenza, in conseguenza di una variazione dell'intera gamma della temperatura di lavoro (che anch'essa deve essere indicata). Ad esempio, se un quarzo ha una deriva termica di 30ppm e una temperatura di lavoro di $-10^{\circ}C \div 70^{\circ}C$, la sua frequenza potrà variare di 30ppm (ossia dello 0,003%) per una variazione della temperatura da $-10^{\circ}C$ a $+70^{\circ}C$. Allo scostamento dovuto alla deriva termica deve essere sommata la tolleranza già considerata.

❖ Cifra di rumore: è definita come:

$$NF = 10 \log_{10} F, \quad (51)$$

dove F è il rapporto fra la densità spettrale di rumore in uscita dall'amplificatore reale e quella dell'amplificatore ideale (quello cioè senza generatori di rumori).

1.7.3 Prestazioni

Essendo l'amplificatore differenziale un amplificatore, occorre calcolare il guadagno. Il guadagno indica quanto un amplificatore può amplificare e si ottiene, di solito, facendo il rapporto tra tensione di uscita e tensione di ingresso, se si vuole il guadagno di tensione. Nel nostro caso essendo due gli ingressi vi sono due modi di calcolare il guadagno.

Prima di tutto diciamo che vi sono diversi modi di applicare un segnale all'ingresso.

Primo modo. Prevede di collegare il morsetto invertente a massa, e di applicare un solo segnale V_i al morsetto non invertente. In uscita otteniamo il segnale V_u amplificato di A_I volte, però V_u è in fase col segnale di ingresso, cioè:

$$V_u = A_I V_i \quad (52)$$

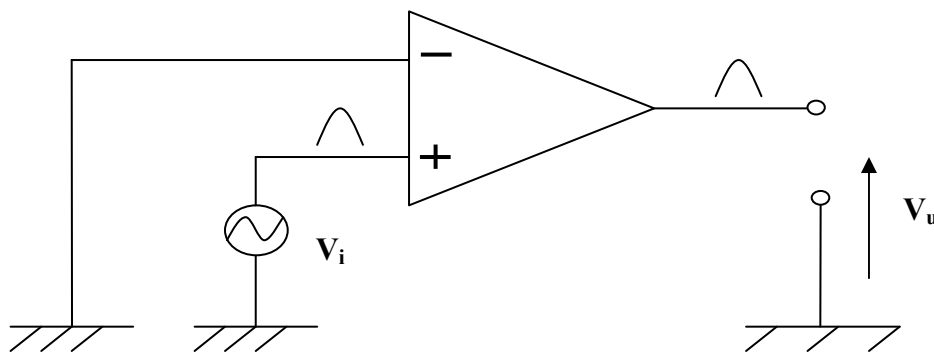


Fig.1.28 - Primo schema di collegamento in un amplificatore

Dobbiamo notare che il morsetto a cui non è applicato il segnale in ingresso, va comunque collegato a massa e non lasciato libero, cioè a potenziale non definito. Collegandolo a massa, siamo sicuri che il segnale applicato in ingresso, su quel morsetto, è nullo.

Secondo modo. Prevede di collegare il morsetto non invertente a massa, e di applicare un solo segnale V_i al morsetto invertente.

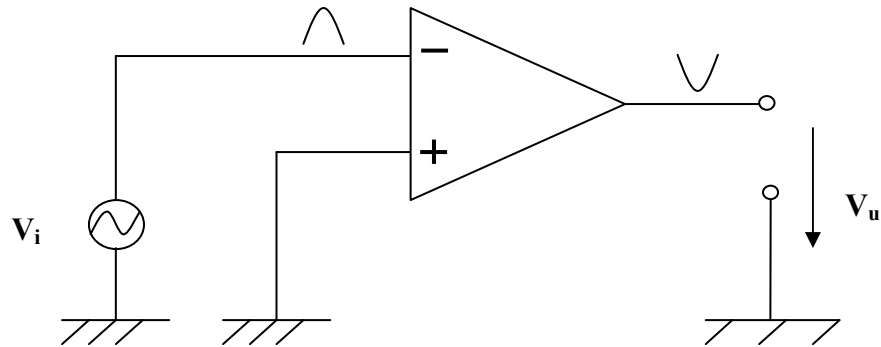


Fig. 1.29 - Secondo schema di collegamento in un amplificatore

In uscita otteniamo il segnale V_i amplificato di A_2 volte, però V_u è sfasato di 180° rispetto al segnale di ingresso, cioè:

$$V_u = A_2 V_i \quad (53)$$

In pratica A_1 rappresenta il guadagno di tensione dell'amplificatore differenziale quando il segnale viene applicato sul morsetto non invertente, e contemporaneamente il morsetto invertente è collegato a massa. A_1 è un numero positivo, poiché il segnale in uscita è in fase col segnale di ingresso. Invece, A_2 rappresenta il guadagno di tensione dell'amplificatore differenziale quando il segnale viene applicato sul morsetto invertente e, contemporaneamente, il morsetto non invertente è collegato a massa. A_2 è un numero negativo, perché il segnale di uscita è sfasato di 180° , rispetto al segnale di ingresso.

Terzo modo. Prevede di collegare contemporaneamente lo stesso segnale ai due ingressi.

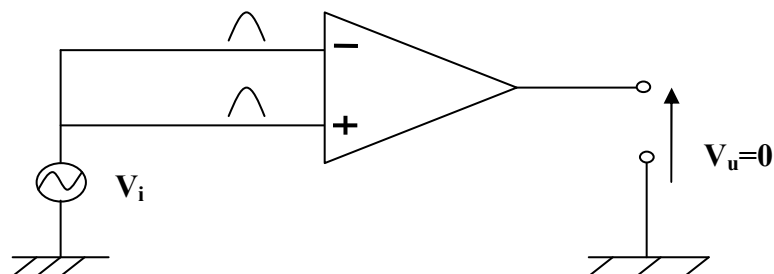


Fig. 1.30 - Terzo schema di collegamento in un amplificatore

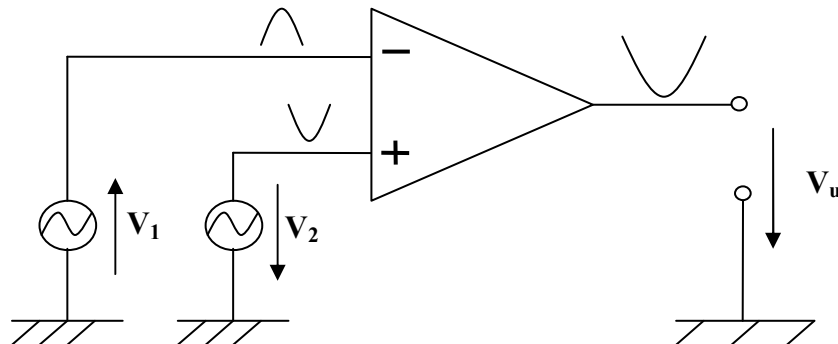
Poiché il primo segnale viene amplificato di A_1 volte con sfasamento nullo ed il secondo segnale viene amplificato di A_2 volte e sfasato di 180° , essendo $A_1 = A_2$ ma di segno opposto, il segnale di uscita è nullo.

Tale tipo di collegamento si dice di modo comune, perché il segnale viene applicato uguale ai due ingressi, invertente e non invertente.

Segnale uguale, vuol dire che il segnale è uguale in ampiezza, in frequenza e in fase.

Tale collegamento non consente di ottenere un segnale di uscita, cioè possiamo dire che il segnale non passa, ma viene respinto indietro. Si dice **reiezione di modo comune** il fatto che il segnale viene rinviato indietro.

Quarto modo. Prevede di applicare sul primo ingresso un segnale in fase e sull'altro si applica un segnale uguale come ampiezza e frequenza, però sfasato di 180° .

*Fig. 1.31 - Quarto schema di collegamento in un amplificatore*

Di conseguenza in uscita otteniamo un segnale amplificato del doppio rispetto ad un normale amplificatore avente guadagno A_1 , oppure guadagno A_2 . Tale tipo di collegamento si dice di modo differenziale.

1.7.4 Dati caratteristici

Diamo, ora, alcuni dati che sono validi per un normale amplificatore operazionale ed in particolare per il $\mu A 741$.

Resistenza di ingresso. E' la resistenza vista tra i due ingressi dell'amplificatore operazionale, quando è collegato a catena aperta, cioè senza reazione.

Ricordiamo che si dice reazione il fatto di riportare in ingresso parte del segnale di uscita. Per il μA 741 è $R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$.

Resistenza di modo comune. E' la resistenza di uno degli ingressi rispetto a massa quando l'altro ingresso è isolato. Per il μA 741 è $R_{mc} = 400 \text{ M}\Omega$.

Tensione di fuori zero d'ingresso. E' la tensione che deve essere applicata tra i due ingressi in modo da annullare la tensione di uscita, quando in ingresso non vi è alcun segnale. Infatti a causa della non eguale amplificazione dei due stadi che costituiscono l'amplificatore differenziale, in uscita si ha una tensione $\neq 0$, anche quando l'ingresso è nullo. Per evitare ciò, si applica una piccola tensione di ingresso, secondo lo schema di fig. 1.32.

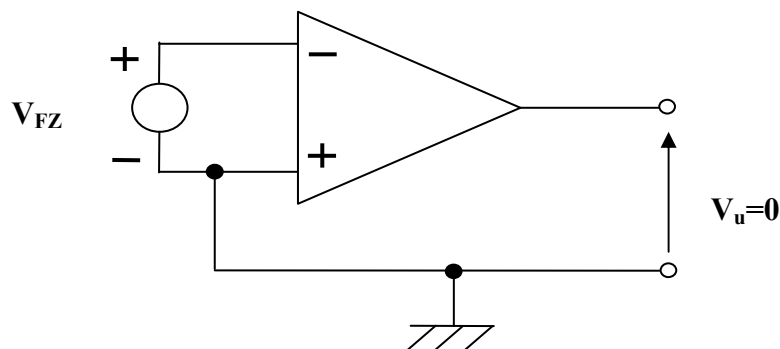


Fig. 1.32 - Schema di amplificatore differenziale con tensione fuori zero d'ingresso

L'amplificatore risulta bilanciato quando la tensione di uscita è nulla. La tensione di fuori zero per il μA 741 è $V_{fz} = 1 \text{ mV}$.

Massima tensione di ingresso. E' la massima tensione che si può applicare tra un ingresso e massa. Per il μA 741 è $V_{in} = \pm 15 \text{ V}$.

Resistenza di uscita. E' la resistenza tra uscita e massa, quando l'amplificatore è collegato a catena aperta. Per il μA 741 è $R_u = 75 \Omega$.

Massima tensione di uscita. E' la massima tensione tra uscita e massa, senza distorsione del segnale. Per il μA 741 è $V_u = \pm 13,5 \text{ V}$.

Corrente di corto circuito. E' la massima corrente che l'amplificatore può fornire in uscita. Per il μA 741 è $I_{cc} = 25 \text{ mA}$.

Guadagno di tensione. E' il rapporto tra la tensione di uscita e la tensione di ingresso di modo differenziale, quando l'amplificatore è collegato a catena aperta. Per il μA 741 è:

$$A = \frac{V_u}{V_i} = 200.000 \quad . \quad (54)$$

Rapporto di reiezione di modo comune. E' il rapporto tra il guadagno di modo differenziale A_d ed il guadagno di modo comune A_s . Per il μA 741 è:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_s} \quad . \quad (55)$$

Oppure usando il decibel:

$$CMRR = 20 \lg \frac{A_d}{A_s} = 90dB \quad (56)$$

Risposta in frequenza. Indica la banda di frequenze in cui il guadagno dell'amplificatore non si riduce di molto. In particolare, per il μA 741 la frequenza di taglio è $F_T = 1$ MHz.

Ricordiamo che la frequenza di taglio si trova quando l'amplificazione è uguale a uno, cioè 0 dB.

CAPITOLO 2

TARATURA DEGLI STRUMENTI DI MISURA**2.1 Generalità**

Le prove, le analisi e le misurazioni, nei processi di produzione di beni e servizi, sono condotte ai fini di:

- Ricerca scientifica, sviluppo tecnologico (studio di nuove sostanze e materiali, sperimentazione di prototipi, ecc.)
- Valutazione di conformità a regole, norme e specifiche tecniche in genere.

Tali attività rivestono grande importanza per il progresso tecnico-scientifico, la crescita della competitività del sistema economico e lo sviluppo del benessere della società civile e sono svolte da apposite strutture, indicate con il termine “laboratori”.¹

Le attività sperimentali rappresentano il “cuore” dei processi di costruzione ed assicurazione della qualità ed i corrispondenti operatori (laboratori) costituiscono l’ossatura del sistema per la qualità.

Si noti che circa 10 % del PIL (prodotto interno lordo) nei paesi più sviluppati è costituito da prove, analisi, misurazioni e affini (con costante tendenza alla crescita). La realizzazione e l’assicurazione della qualità dei servizi resi dal laboratorio si basano sulla conformità a determinati requisiti stabiliti dall’apposita normativa quadro ed ispirati ai criteri di buona prassi professionale, da un lato, e di efficace gestione aziendale, dall’altro.

La conformità ai requisiti applicabili deve essere, innanzi tutto, realizzata e quindi mantenuta nel tempo. Essa può essere formalmente attestata attraverso varie forme di riconoscimento, quali, ad esempio, il cosiddetto “accreditamento” del laboratorio nell’ottica del processo dinamico di gestione per la qualità. La corretta ed efficace attuazione del sistema ed il rispetto dei requisiti applicabili devono essere continuamente monitorati al fine di individuare eventuali anomalie e scostamenti rispetto ai criteri e procedimenti prefissati (non conformità), adottare i necessari provvedimenti (trattamenti e azioni correttive) ed ottenere indicazioni preziose per il miglioramento continuo della organizzazione e delle sue attività (azioni preventive e di miglioramento).

Entrambi gli aspetti di progettazione/realizzazione e sorveglianza/adeguamento trovano puntuale, sia pur generico, riscontro nella

¹ Definizione di laboratorio: insieme strutturato di risorse umane e strumentali impegnate in modo organico e sistematico nello svolgimento di attività sperimentali.

norma ISO/IEC 17025 “criteri generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura”, pubblicata in data 15.12.1999 come norma internazionale sostitutiva della guida ISO/IEC 25:1990 e successivamente recepita anche come norma europea (EN ISO/IEC 17025:2000) che ha sostituito, a tutti gli effetti, la normativa pre-esistente a decorrere dal 10 gennaio 2003. Gli elementi che la norma ISO/IEC 17025 pone alla base di una corretta progettazione e realizzazione del sistema sono rappresentati da requisiti generali o sistemici, suddivisi in:

- requisiti organizzativi e gestionali;
- requisiti di competenza tecnica.

Fra questi ultimi, particolare importanza rivestono i requisiti specifici attinenti alla qualità metrologica delle prove e misure.

Gli strumenti che la stessa norma identifica come adeguati ad assicurare un efficace monitoraggio del sistema di gestione per la qualità e dei processi ad esso correlati, garantendone l’adeguamento ed il miglioramento in funzione della naturale evoluzione del laboratorio, sono rappresentati da attività di controllo e valutazione che riguardano tutti gli aspetti e momenti dei processi gestiti dal laboratorio stesso.

La piena ed efficace applicazione di detti elementi e strumenti non richiede solo una adeguata formalizzazione documentale (manuali, procedure, istruzioni, ecc..) ma si basa anche e soprattutto sulla competenza e professionalità del personale addetto.

Data la particolare natura delle attività svolte dal laboratorio (servizi ad alto contenuto tecnico-scientifico basati su di una elevata competenza professionale), la qualificazione del personale addetto alla progettazione e realizzazione del sistema, nonché di quello preposto al controllo del suo buon funzionamento ed alla verifica del rispetto di tutti i requisiti applicabili, richiede un approccio “dedicato”.

Si noti che documentata evidenza della qualificazione dei valutatori interni è specificatamente richiesta da Sinal per l’accreditamento del laboratorio, specie con riferimento alla nuova norma iso/iec 17025 sopra citata.

In ogni caso, le norme (siano esse regole obbligatorie o norme volontarie) costituiscono il riferimento primario per i processi di costruzione e verifica della qualità e la conformità alle norme è considerata sinonimo di qualità (nei limiti, si intende, consentiti dalla maggiore o minore “bontà” del riferimento normativo considerato).

In tale contesto di riferimento, diverse sono le forme di assicurazione della qualità, intesa come attestazione della conformità ai requisiti applicabili, stabiliti in funzione dei bisogni da soddisfare:

- la certificazione di prodotto tangibile o intangibile (servizio), quale risultato di un processo;

- la certificazione di sistema, quale insieme di elementi fra loro correlati e interagenti, finalizzati alla gestione di processi (sistemi di gestione per la qualità, sistemi di gestione ambientale, sistemi di gestione per la sicurezza e salute ed altri);
- la certificazione di personale, figure professionali che svolgono rilevanti attività socioeconomiche a livello individuale;
- le attività di ispezione di progetti, prodotti, servizi, processi e impianti.

Nell'ambito delle tipologie sopra elencate, rientrano, poi, ove applicabili, le attività sperimentali (prove, misure, analisi) e le attività di conferma metrologica (regolazioni, messe a punto, tarature), quali supporto metrologico alle attività sperimentali. Per essere credibili, esse si devono fondare su validi presupposti ed essere condotte in modo tecnicamente corretto e professionalmente rigoroso, efficace ed efficiente.

La rispondenza degli Enti di accreditamento alle Norme ad essi applicabili è verificata tramite visite ispettive reciproche ("peer reviews") effettuate nell'ambito degli accordi internazionali di cooperazione MLA (accordi di mutuo riconoscimento) tra gli stessi Enti.

In Italia sono attivi tre Enti di accreditamento:

- SIT (servizio di taratura in Italia) che cura l'accreditamento dei laboratori di taratura, fondato nel 1979;
- SINAL (sistema nazionale per l'accreditamento di laboratori) che si occupa dell'accreditamento dei laboratori di prova e analisi, fondato nel 1988;
- SINCERT (sistema nazionale per l'accreditamento degli organismi di certificazione e ispezione) che accredita gli organismi di certificazione ed ispezione, fondato nel 1991.

L'accreditamento rappresenta una funzione particolarmente critica del sistema per la qualità e di grande importanza per la credibilità del sistema stesso. I principi e la prassi dell'accreditamento devono essere continuamente perfezionati, attraverso il miglioramento delle norme applicabili e lo sviluppo di guide settoriali.

I soggetti accreditati e gli utenti dei servizi accreditati devono svolgere un ruolo attivo in questo processo, contribuendo allo sviluppo della normativa ed al buon funzionamento degli Enti di accreditamento, con l'obiettivo di educare il mercato a riconoscere ed utilizzare il valore di tale qualificazione.

2.2 Definizioni

Accuratezza di misura	Parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuiti al misurando.
------------------------------	--

Apparecchiatura per misurazione	Strumento di misura, software, campione di misura, materiale di riferimento o apparato ausiliario, ovvero un'opportuna combinazione di questi, necessari per realizzare un processo di misurazione.
Campione	Campione materiale, strumento per misurazione, materiale di riferimento o sistema di misurazione destinato a definire, realizzare, conservare o riprodurre una unità oppure uno o più valori noti di una grandezza per trasmetterla per confronto ad altri strumenti per misurazione.
Campioni di riferimento	Pesi singoli o combinazioni di pesi di cui si conoscono abbastanza i valori di massa e l'incertezza di misura, permettendo in questo modo il loro uso nella taratura di altri pesi od oggetti e dispositivi di pesatura.
Campione nazionale	Campione riconosciuto con decisione ufficiale nazionale, come base per fissare in una nazione il valore di tutti gli altri campioni di una grandezza in questione.
Campione prototipo internazionale	L'unità di misura della massa è incorporata in un cilindro di platino-iridio custodito presso l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (BIPM) a Sèvres in Francia. Il peso di questo cilindro corrisponde, per definizione, ad 1 kg esatto.
Campo di pesatura	Intervallo compreso fra la portata minima e la portata massima.
Caratteristica metrologica	Insieme di operazioni richieste per garantire che un'apparecchiatura per misurazione sia conforme ai requisiti per l'utilizzazione prevista.
Carico di sicurezza (Lim)	Carico statico massimo che può essere tollerato dallo strumento senza alterare in modo permanente le sue qualità metrologiche.
Classe di Precisione	classe di strumenti per misurazione che soddisfano determinati requisiti metrologici volti a contenere gli errori entro limiti specifici.
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
Conferma metrologica	Insieme di operazioni richieste per assicurare che una funzione di un apparecchio per misurazione sia in uno stato di conformità ai requisiti per l'utilizzazione prevista.
Correzione	I valori di un peso o di una massa sono convenzionalmente espressi da due numeri: uno corrisponde alla massa nominale del peso ed il secondo alla correzione. Quindi la massa del peso è costituita dal valore nominale assegnato più la correzione assegnata. Le correzioni positive stanno ad indicare che il peso incorpora una massa maggiore di quanto indicato dal valore nominale assegnato.

Deriva	Lenta variazione nel tempo di una caratteristica metrologica di uno strumento per misurazione.
Dichiarazione di conformità	Procedura mediante cui il fabbricante metrico, che abbia installato un sistema di garanzia della qualità, dichiara che gli strumenti in esame sono conformi, per la categoria di strumenti interessata, ad apposito provvedimento della Direzione Generale per l'Armonizzazione e la Tutela del Mercato.
Dispositivo di azzeramento	Dispositivo che consente di predisporre l'indicazione a zero quando non ci sono carichi sul dispositivo ricettore del carico.
Dispositivo di livellamento	Dispositivo che consente di predisporre uno strumento nella sua posizione di riferimento.
Dispositivo di tara	Dispositivo che permette di azzerare l'indicazione dello strumento quando un carico è posto sul dispositivo ricettore del carico: <ul style="list-style-type: none"> - senza influire sul campo di pesatura dei carichi netti (dispositivo additivo di tara), o - riducendo il campo di pesatura dei carichi netti (dispositivo sottrattivo di tara).
Divisione reale (d) della scala	Valore espresso in unità di massa (il più piccolo incremento di peso leggibile): <ul style="list-style-type: none"> - della differenza fra i valori corrispondenti a due riferimenti della scala consecutivi, per una indicazione analogica, oppure - della differenza fra due indicazioni consecutive, per una indicazione digitale.
Divisione di verifica (e) della scala	Valore espresso in unità di massa utilizzato per la classificazione e la verifica di uno strumento legale.
EA	European cooperation for Accreditation).
EAL	European Accreditation of Laboratories.
ENEA	Ente Nazionale per l'Energia e Ambiente
Errore di misura	Differenza algebrica tra il valore misurato e il valore vero del misurando. In generale il vero valore è sconosciuto o difficilmente calcolabile.
Errori massimi ammessi	Valori estremi dell'errore ammesso dalle specifiche, dai regolamenti, ecc. per un determinato strumento per misurazione.

Fabbricante Metrico	Persona fisica o giuridica provvista di Presa d'Atto Prefettizia che l'abilita all'esercizio dell'attività di Fabbricante e/o Riparatore metrico, valida su tutto il territorio Nazionale.
Grandezza	Attributo di un fenomeno, corpo o sostanza, che può essere distinto qualitativamente e determinato quantitativamente.
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferrarsi
IMGC	Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti
INMRI	Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
I.N.R.I.M.	Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
Incertezza di misura	Un parametro, associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori che possano ragionevolmente essere attribuiti al misurando.
Incertezza di misura estesa	L'incertezza di misura estesa, U , è il risultato dell'incertezza di misura standard moltiplicata per il fattore di estensione. Si trova di solito con una probabilità di quasi il 95% nell'intervallo di valore assegnato $K = 2$.
Intervallo di Taratura (o di conferma)	Periodo trascorso il quale l'apparecchiatura di misurazione deve essere sottoposta ad un'operazione di verifica/ritaratura, affinché si prevenano variazioni che possano compromettere l'idoneità metrologica.
Massimo campo di pesatura	Campo operativo della bilancia. Si potrà caricare la bilancia fino al valore di pesatura che viene indicato come limite massimo.
Mandatario	Persona fisica o giuridica autorizzata dal fabbricante, per iscritto, ad agire a suo nome in funzione di compiti specifici.
Metrologia	Scienza che ha per oggetto lo studio delle questioni inerenti alla misurazione delle grandezze fisiche. In essa rientrano il calcolo dimensionale e la teoria degli errori, i problemi relativi alla scelta dei sistemi di misure, alla scelta delle grandezze fondamentali di ciascun sistema e dei corrispondenti campioni, alla realizzazione e conservazione di questi e dei campioni secondari, alla determinazione dei rapporti tra varie unità.

Metrologia Legale	Intesa come ramo della “metrologia”, è l’insieme delle procedure legislative, amministrative e tecniche stabilite dalle pubbliche autorità, al fine di specificare e assicurare la qualità, in modo contrattuale o per prescrizioni di legge, e la veridicità delle misure in materia di controlli ufficiali, commercio, salute, sicurezza e ambiente. I fini istituzionali di questo ambito di attività sono quindi essenzialmente rivolti a garantire la pubblica fede in ogni tipo di rapporto economico “inter partes” attraverso l’esattezza della misura.
MICA	Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato
Misura	Informazione costituita da un numero, un'incertezza e un'unità di misura, assegnata a rappresentare un parametro in un determinato stato del sistema.
Misurando	Grandezza oggetto della misurazione.
Misurazione	Insieme di operazioni aventi lo scopo di determinare il valore di una grandezza.
Mobilità (sensibilità)	Attitudine di uno strumento a reagire a piccole variazioni di carico.
O.I.M.L.	Organizzazione Internazionale di Metrologia Legale
Organismo Notificato	Ente pubblico o privato, Laboratori, Istituti di certificazione notificati da parte delle autorità nazionali di ciascuno Stato membro Europeo. Un organismo può essere notificato sia per il controllo del prodotto a livello di progettazione (approvazione del modello), sia a livello della produzione (valutazione del sistema qualità). Gli organismi debbono essere notificati per le funzioni cui sono preposti.
Precisione / linearità	Massima deviazione del corso lineare teorico del tracciato sul display dopo il più ed il meno
Portata massima (Max.)	Portata massima della pesatura, non tenendo conto della portata additiva di tara.
Portata minima (Min.)	Valore del carico al di sotto del quale i risultati delle pesature possono essere affetti da un errore relativo eccessivo.
Processo di misurazione	Insieme di operazioni effettuate per determinare il valore di una grandezza.

Provvedimento di Concessione	Attribuzione al fabbricante della facoltà di autocertificare gli strumenti in sostituzione della verifica prima effettuata dalle Camere di Commercio competenti. Il provvedimento di “Concessione di Conformità Metrologica” contiene: l’indicazione delle categorie degli strumenti interessati dalla concessione, le iscrizioni e le caratteristiche dei marchi e dei sigilli di protezione sostitutivi dei bolli delle Camere di Commercio che il fabbricante deve apporre sugli strumenti, le modalità che il fabbricante deve seguire nella legalizzazione degli strumenti, l’indicazione dell’Organismo che ha certificato la conformità del S.Q.
Regolamento Tecnico	Regolamento che riporta requisiti tecnici o direttamente o tramite riferimenti, oppure incorporando il contenuto di una norma, una specifica tecnica o un codice di una pratica. Nell’ambito della metrologia legale solitamente si intende per <i>Regolamento Tecnico</i> il regolamento per la fabbricazione dei pesi, delle misure e degli strumenti per pesare o misurare, approvato con Regio Decreto del 12 giugno 1902, n.226 e successive modificazioni ed integrazioni.
Regolazione del campo di pesatura di una bilancia	Serve a garantire la precisione della bilancia, attraverso l’utilizzo del peso di regolazione esterno in dotazione. Si rende necessaria per variazioni di temperatura, mutate condizioni ambientali, cambiamento di posizione, ecc.; si consiglia come routine di controllo quotidiana.
Riferibilità	Proprietà del risultato di una misurazione consistente nel poterlo riferire a campioni approvati, generalmente nazionali od internazionali attraverso una catena ininterrotta di confronti.
Ripetibilità	Attitudine di uno strumento a fornire risultati simili per uno stesso carico deposto più volte in modo praticamente identico sul dispositivo ricettore del carico, in condizioni di prova ragionevolmente costanti.
Riproducibilità (Scarto tipo, deviazione standard)	Misura di corrispondenza attraverso ripetute misurazioni (es. di bilance) sotto le stesse condizioni.
Risoluzione	Attitudine di uno strumento a rispondere a piccole variazioni del segnale di ingresso.
Ritaratura	Nuovo test periodico di uno strumento di misura (es.: bilance / pesi) per controllarne la precisione

Scala della tara	Va sottratta. Il campo di pesatura reale è quello ridotto del carico della tara.
Sensibilità	Per un certo valore di massa del misurando, è il quoziente della variazione della variabile osservata I per la corrispondente variazione di massa misurata M : $k = \Delta I / \Delta M$
Sistema di gestione della misurazione	Insieme di elementi correlati o interagenti necessari per effettuare la conferma metrologica e il controllo continuo dei processi di misurazione
SIT	Sistema Italiano di Taratura
SNT	Sistema Nazionale di Taratura
Stabilità	Attitudine di uno strumento per misurare a mantenere costanti le sue caratteristiche metrologiche.
Strumenti Metrici	Strumenti atti alla misurazione di grandezze fisiche. Nell'ambito della metrologia legale, si intendono usualmente gli strumenti contemplati nel Testo Unico delle leggi sui pesi e sulle misure e nel Regolamento Tecnico per il servizio metrico, la cui utilizzazione è volta alla determinazione della qualità e/o prezzo nelle transazioni commerciali, ivi comprese quelle destinate al consumatore finale.
Strumento per pesare	Strumento per misurazione che serve a determinare la massa di un corpo utilizzando l'azione della gravità che agisce su di esso.
Strumento per pesare a funzionamento non automatico	Strumento per pesare che richiede l'intervento di un operatore nel corso della pesata, per esempio per deporre o togliere dal dispositivo ricettore del carico i carichi da pesare e anche per ottenere il risultato.
Taratura	Insieme delle operazioni che stabiliscono, sotto condizioni specificate, la relazione tra i valori indicati da uno strumento di misurazione, o da un sistema per misurazione, o i valori rappresentati da un campione materiale e i corrispondenti valori noti di un misurando.
Testo Unico	Raccolta sistematica di disposizioni legislative già esistenti nell'ordinamento giuridico e riguardanti materie determinate. Nell'ambito della metrologia legale si intende usualmente il testo unico delle leggi sui pesi e sulle misure approvato con Regio Decreto il 23 agosto 1890 n. 7088 e successive modificazioni.

Tolleranza (di regolazione)	La definizione classica di tolleranza di regolazione è "lo scarto ammesso tra il valore nominale assegnato di un peso e la massa reale del peso, stabilita su delle basi specifiche".
Tolleranza (di gruppo)	Quando si ha a che fare con oggetti di pesatura diversi dai pesi, oppure si mettono a confronto varie sommatorie di pesi, l'interesse verte principalmente sullo scostamento del totale della sommatoria dalla somma dei valori nominali. Le tolleranze di gruppo, se vengono specificate, sono inferiori alla somma unidirezionale delle tolleranze dei singoli pesi che compongono la sommatoria.
Tracciabilità	E' una sequenza ininterrotta di misurazioni di incertezze tra i dispositivi che compongono la catena di calibrazione.
Tracciabilità conformemente alla normativa nazionale	La normativa ISO 9000, al capitolo sul controllo delle attrezzature di misura, richiede che tutte le attrezzature di misura (es. pesi) siano conformi allo standard di legge. Ciò impedisce misure errate.
Transazioni Commerciali	A tale locuzione va attribuito un significato estensivo per il quale sono da intendersi soggetti all'obbligo della verifica tutti quegli strumenti adoperati in operazioni di pesatura e misurazione correlate a determinare un qualunque tipo di corrispettivo (prezzo, multa, tassa, indennità, ecc.).
Unità di misura	Grandezza determinata, adottata per convenzione, usata per esprimere grandezze quantitativamente aventi la stessa dimensione.
Valore lordo (G o B)	Indicazione del peso del carico su uno strumento, quando nessun dispositivo di tara o dispositivo di prefissazione della tara sia stato messo in opera.
Valore netto (N o Net)	Indicazione del peso di un carico posto su uno strumento dopo la messa in opera di un dispositivo di tara.
Valore della risoluzione	Espressione quantitativa dell'attitudine di un dispositivo indicatore a far apparire significativamente la differenza fra valori molto vicini della grandezza indicata
Valore della tara (T)	Indicazione del peso di un carico posto su uno strumento dopo la messa in opera di un dispositivo di tara.
Verificazione Periodica	Accertamento del mantenimento nel tempo dei requisiti metrologici degli strumenti metrici, e loro corretto utilizzo in rapporto con terzi.

Verificazione Prima	Accertamento tramite esame, prove e controlli dei requisiti metrologici di legge, che conferiscono agli strumenti metrici il valore di strumenti legali. La successiva apposizione dei bolli legali li contraddistingue e ne protegge da manomissioni.
----------------------------	--

2.3 Scelta della massa e classe di precisione

Se le prove vengono eseguite solo con un unico peso di prova, bisogna tener conto sia del carico massimo che del valore di regolazione più alto della bilancia (normalmente visualizzato sul display della bilancia).

Se la bilancia dispone di un peso di regolazione esterno, questo può diventare, previa certificazione, il peso di prova. Nel caso in cui deve essere provata la linearità della bilancia, si consiglia di graduare i pesi di prova, a seconda della percentuale del carico massimo, nel modo seguente:

10 / 20 / 30 / 40 / 50 / 60 / 70 / 80 / 90 / 100 %

Limitandosi ad una bassa precisione, si possono effettuare n. 5 letture al 25, 50, 75, e 100%; più 2 valori al 25 e 50%, con l'applicazione di una tara con valore di 1/3 del carico massimo dello strumento.

Per la scelta del peso di prova adatto va determinata l'esatta precisione (MPE = Maximum Permissible Error).

La regola fondamentale per la pratica di misurazione impone che il rapporto tra la tolleranza del campione di massa e quella dello strumento di misura sia almeno di 1:3, o migliore.

Dal momento che non è facile determinare l'incertezza di misura di una bilancia, si usa il più piccolo incremento numerico leggibile "d" (divisione).

Nel caso si volesse determinare l'incertezza di misura di una bilancia, esistono varie aziende sia in Italia che all'estero che commercializzano software applicativi, che provvedono ad effettuare automaticamente tutti i calcoli matematici relativi a tutte le prove effettuate sullo strumento, comprensivo dei valori dello scarto tipo della bilancia (S) e dell'incertezza estesa (U) della bilancia. Il pacchetto software è accompagnato dal manuale operativo e dal manuale delle formule matematiche utilizzate nel programma di taratura.

Per la scelta del peso di prova, va determinata l'esatta classe di precisione. Ci sono varie classi di precisione legali per i pesi:

E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3

L'MPE viene graduato secondo il rapporto di 1:3; E1 è la classe di precisione più accurata, mentre M3 è la più approssimativa. Per pesi di prova con valore nominale prossimo al carico massimo la giusta classe di precisione dovrà

risultare dal valore nominale e dall'errore MPE, secondo quanto indicato nella prima colonna della tab. 2.1.

E' possibile controllare una bilancia con un peso o i pesi come spiegato in precedenza, secondo quanto indicato nella tab. 2.1.

Tab. 2.1 - Pesi di prova e classi di precisione delle bilance

Peso di prova	Bilancia	Risoluzione
<i>Classe di precisione</i>	<i>Categoria</i>	
M1	II e III	Fino a 10.000 d
F2	II	Fino a 50.000 d
F1	II	Fino a 100.000 d
E2	I	Oltre 100.000 d

L'OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) classifica le bilance con le seguenti categorie:

Classe I <i>Bilance analitiche</i>	Classe II <i>Bilance di precisione</i>	Classe III <i>Bilance Commerciali</i>
---------------------------------------	---	--

2.4 Taratura e riferibilità

Una catena di riferibilità consiste in una successione continua di confronti che assicurano che il risultato di una misurazione o il valore attribuito a un campione materiale possa essere riferito a campioni di misura di livello superiore, fino ad un campione primario.

L'industria in Europa garantisce la riferibilità al più alto livello internazionale servendosi dei servizi metrologici erogati dai laboratori europei accreditati.

Per l'industria statunitense il NIST (National Institute for Standards and Technology) è il garante della riferibilità al più alto livello internazionale.

Uno strumento fondamentale per garantire la riferibilità del risultato di una misurazione è la taratura delle apparecchiature per misurazione utilizzate.

La taratura consiste nella definizione delle caratteristiche metrologiche di un'apparecchiatura per misurazione e viene eseguita mediante un confronto diretto con opportuni campioni di misurazione. Al termine viene emesso un certificato di taratura e, nella maggior parte dei casi, viene applicata sull'apparecchiatura un'apposita etichetta. Servendosi di queste informazioni l'utilizzatore può decidere se l'apparecchiatura sia adatta per l'applicazione di interesse.

Tre sono i motivi principali per far tarare gli strumenti di misura:

- ✓ garantire che le letture fatte da uno strumento concordino con i risultati di altre misurazioni;
- ✓ definire l'accuratezza delle letture dello strumento;
- ✓ stabilire l'attendibilità dello strumento, vale a dire, se e quanto ci possiamo fidare dei risultati che esso propone.

Mediante la taratura di uno strumento è possibile ottenere quanto segue:

- il risultato di una taratura consente di individuare sia la correlazione tra la scala dello strumento e la grandezza fisica in misura (attraverso l'attribuzione di valori della grandezza in misura alle letture proposte dallo strumento) sia l'entità di eventuali correzioni da apportare alle letture proposte;
- una taratura può anche individuare altre caratteristiche metrologiche dell'apparecchiatura in esame, quali gli effetti delle grandezze d'influenza;
- il risultato di una taratura può essere registrato in un documento, chiamato frequentemente Certificato di Taratura o Rapporto di Taratura.

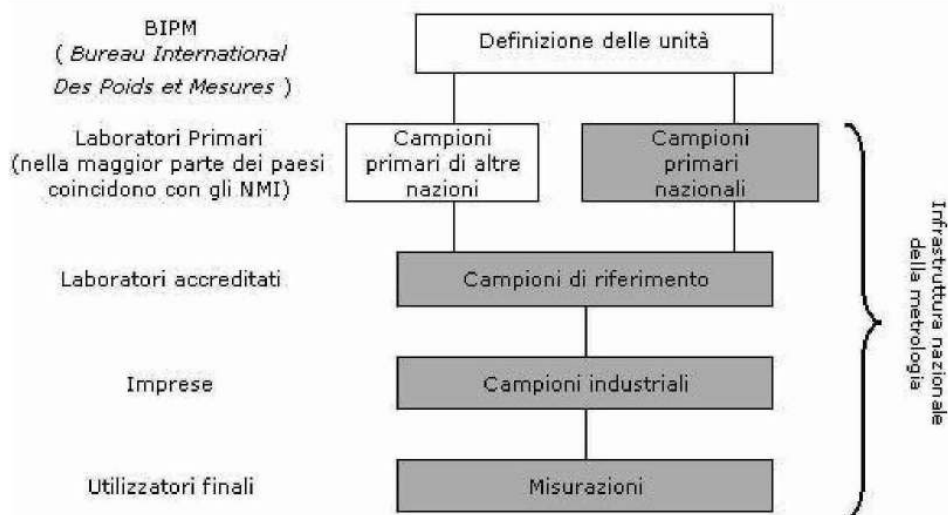


Fig.2.1 - La catena di riferibilità.

2.5 Campioni di misurazione

Un campione di misurazione, o etalon, è un campione materiale, uno strumento di misurazione, un materiale di riferimento o un sistema di misurazione atto a definire, realizzare, conservare o riprodurre una unità, ovvero uno o più valori noti di una grandezza da utilizzare come riferimento.

Esempio: Il metro è definito come la lunghezza del percorso compiuto dalla luce nel vuoto durante un intervallo di tempo di $1 / 299792\,458$ di un secondo. Il metro è realizzato, a livello primario, tramite la lunghezza d'onda di una radiazione

emessa da un laser a elio-neon stabilizzato allo iodio. Nei sottolivelli, sono utilizzati campioni materiali come i blocchetti piano-paralleli e la riferibilità è garantita dall'uso di interferometria ottica per definire la lunghezza dei blocchetti piano-paralleli con riferimento alla citata lunghezza d'onda della luce laser.

Nella fig. 2.1 sono rappresentati i diversi livelli dei campioni. Non esiste una lista riconosciuta a livello internazionale che riporti tutti i campioni di misura esistenti.

2.6 Procedura di taratura degli strumenti di misura

Ogni volta che si esegue la taratura di strumenti di misura, bisogna redigere un procedura di taratura. La normativa che regola la redazione della procedura di taratura, stabilendo i criteri base per le procedure di taratura dimensionale, è la norma UNI 9052:1987.

La procedura di taratura deve contenere le seguenti indicazioni:

- lo scopo della procedura taratura;
- l'oggetto della procedura di taratura, cioè il dispositivo di misura a cui si riferisce la procedura;
- i riferimenti, cioè i campioni e le apparecchiature impiegate per la taratura;
- la metodologia operativa, ossia la descrizione delle operazioni da effettuare per la verifica dello strumento da tarare;
- la determinazione della conformità dello strumento rispetto ai dati di cui sopra;
- la definizione dei criteri di calcolo dell'incertezza finale da attribuire allo strumento ed indicazione della formula risolutiva;
- il rapporto sull'esito della verifica.

La procedura di taratura deve essere redatta per la taratura di qualsiasi strumento misuratore di lunghezza, temperatura, pressione, coppia, massa, forza, ecc.: micrometri, calibri a corsoio, tamponi, comparatori, trasduttori, altimetri, alesametri, anelli lisci o filettati, blocchetti piano paralleli, goniometri, livelle, manometri, vacuometri, termocoppie, termoresistenze, camere termostate, chiavi dinamometriche, avvitatori pneumatici, dinamometri, celle di carico, bilance, campioni di massa, ecc.

Le procedure di taratura possono subire modifiche nel tempo; conviene quindi verificare periodicamente la rispondenza di tali procedure di taratura alle esigenze produttive dell'azienda ed alla normativa vigente, ed eventualmente limitare o allargare i limiti tollerati per un dato strumento.

2.7 La taratura dei dispositivi di misure delle forze

In molti casi reali, pur lavorando con trasduttori di ottima qualità, le misure non possono basarsi esclusivamente sul controllo periodico delle

performance del sistema. Effetti di installazione imprevisti, la degradazione dell'attrezzatura nel tempo o l'abuso da parte dell'utente sono tutti fattori che possono portare le misure ad avere una incertezza molto maggiore rispetto a quella prevista nel progetto originario. Di conseguenza la taratura diviene una operazione necessaria per assicurarsi che la misura delle forze rispecchi le esigenze del cliente e posseda il grado di incertezza richiesto.

2.8 Standards e tracciabilità

La tracciabilità riferita agli standard ufficiali è il miglior modo per assicurare accuratezza alle misure e conduce alla interfacciabilità di queste tra vari utenti, in tempi e luoghi diversi.

Una misurazione tracciabile è quella misura che può essere collegata alla misura primaria standard attraverso una catena continua di confronti.

Una forza standard è meno facile da visualizzare rispetto ad una massa, in quanto non ha un'esistenza propria, dev'essere generata da una macchina. Per essa, devono essere note non solo la grandezza con la incertezza richiesta, ma anche la direzione e le condizioni di applicazione al trasduttore durante la prova.

Le macchine in grado di garantire la calibrazione delle forze sono note come "*force standard machines*" e possono essere classificate sia come primarie che secondarie. Le "*primary standards*" nella misurazione delle forze sono macchine la cui incertezza può essere riferita, attraverso principi fisici, direttamente alle unità di misura fondamentali di massa, lunghezza e tempo. Le "*secondary standards*" sono macchine che possono riprodurre forze in maniera affidabile e possono essere comparate alle primary standard con l'uso del "*force transfer standard*", che consiste in un trasduttore di forza calibrato rappresentato, solitamente, da una cella di carico ad estensimetri.

Tab. 2.2 - Tipi di macchine di forza standard

Machine Type	Principle of operation	Uncertainty attainable	Category
<i>Deadweight machines</i>	A known mass is suspended in the Earth's gravitational field and generates a force on the support.	$\pm 0.001\%$	Primary or Secondary
<i>Hydraulic amplification machines</i>	A small deadweight machine applies a force to a piston-cylinder assembly and the pressure thus generated is applied to a larger piston-cylinder assembly.	$\pm 0.02\%$	Secondary
<i>Lever amplification machines</i>	A small deadweight machine with a set of levers which amplify the force	$\pm 0.02\%$	Secondary
<i>Strain-gauged hydraulic machines</i>	The force applied to an instrument is reacted against by strain-gauged columns in the machine's framework.	$\pm 0.05\%$	Secondary
<i>Reference force transducer machines</i>	A force transfer standard is placed in series with the instrument to be calibrated (typically in a materials testing machine).	$\pm 0.05\%$	Secondary

I vari tipi di macchine standard e le loro caratteristiche sono schematicamente riassunte nella tab. 2.2.

Anche la strumentazione usata durante la taratura deve possedere una completa tracciabilità, sia per la taratura completa di un sistema di misurazione delle forze composto dall'insieme trasduttore-strumentazione, che separatamente per la taratura della sola strumentazione.

2.9 Taratura dinamica e multi-assiale

Tutti i metodi e gli standards di taratura esistenti sono stati sviluppati per la taratura di sistemi in cui si misura l'azione di una forza statica lungo un singolo e preciso asse. In molti casi, però, è richiesta la taratura per forze agenti lungo più assi e in situazione di forza non statiche (carico dinamico).

La taratura multi-asse è simile a quella realizzata per un asse solo, ma ripetuta per ogni singolo asse. La taratura di sensori di forza multi-componente è più impegnativa per la strumentazione, sebbene il principio alla base sia lo stesso. Un'attenzione particolare richiede, invece, la misura del cosiddetto "*cross talk*". Quest'ultimo è l'effetto prodotto da una forza di taratura applicata lungo un asse, ma su un diverso componente, per esempio un output sull'asse x del trasduttore provocato da una forza applicata sull'asse y. Per misurare un cross talk dello 0,1% con una incertezza massima dello 0,01%, la forza deve essere perfettamente allineata ad una asse avente angolo teorico inferiore a 20°, cosa che dimostra la assoluta necessità di macchine di test molto speciali.

Nel momento in cui è stata valutata la necessità di una taratura dinamica, non era ancora presente alcuna normativa ufficiale in merito. Si sono applicate le sensibilità derivate da prove statiche dei trasduttori di forza anche ai casi di sollecitazione di tipo variabile nel tempo.

Il comportamento non dinamico (frequenza naturale) delle rondelle e dei dinamometri dipende molto dalla robustezza e dai carichi della struttura in cui è montato il sensore. Alcuni produttori, tuttavia, non fissano tale valore.

2.10 Varie opzioni per valutare l'incertezza di un sistema di misurazione di una forza

Il primo tipo di valutazione dell'incertezza di una macchina di misura delle forze consiste nel lasciare permanentemente il trasduttore di forza nella sua posizione di installazione e usare uno standard di trasferimento per fare le tarature.

Il secondo tipo consiste nel tarare il trasduttore di forza prima della installazione e rimuoverlo poi nelle successive tarature.

L'ultima opzione è quella di calibrare il trasduttore di forza prima della sua installazione permanente nel sistema di misura della forza e di non ricalibrarlo durante la fase di installazione.

- Il metodo più usato per un sistema che necessita di un basso grado di incertezza è quello di fissare il trasduttore di forza e poi usare uno standard di trasferimento per attuare una taratura regolare. Prima del fissaggio in fase di installazione il trasduttore di forza dovrebbe essere calibrato in tutto il suo range di funzionalità, riproducendo, ove possibile, le condizioni di funzionamento previste compreso il range, la direzione, intervallo di variazione e durata della forza applicata, temperatura e simulazione di un ciclo di lavoro tipo. Questa taratura iniziale, che potrebbe essere fatta dal costruttore prima della messa in commercio, è usata per determinare effetti dovuti da creep, non ritorno allo zero, isteresi e non linearità.

In corrispondenza di intervalli opportunamente scelti nella vita del sistema, viene installato uno standard di trasferimento nel sistema in serie con il dispositivo fisso e gli output vengono confrontati sulla base di un range di forze applicate. Queste tarature assicurano la costanza del livello di incertezza e contribuiscono all'identificazione di ogni cambiamento o problema nell'installazione o nel trasduttore.

L'uso di tarature automatizzate potrebbe essere appropriato quando si tenta di raggiungere bassi livelli di incertezza e/o scale temporali di taratura ridotte. Questo tipo di taratura riflette in maniera più accurata le condizioni operative del trasduttore di misura della forza e quindi può ridurre l'incertezza del sistema.

- Se il trasduttore di forza può essere rimosso dall'installazione, allora in aggiunta alla taratura iniziale si può anche rimuoverlo per effettuare periodiche ricalibrature secondo gli standards previsti. Questo metodo fornisce al trasduttore una taratura accurata, ma potrebbe non tenere in conto deficienze di installazione come attriti, disallineamenti etc.. La strumentazione potrebbe essere tarata insieme al trasduttore o separatamente secondo un diverso standard di riferimento.
- Un trasduttore fissato senza una taratura periodica si usa solitamente nei casi in cui la taratura per rimozione e quella in-situ risultino impraticabili. La calibratura iniziale dovrebbe stabilire il livello di incertezza nell'ambito dei requisiti del sistema per rispettare le deformazioni e il deterioramento del trasduttore durante la sua vita operativa. Una certa confidenza nella incertezza operativa potrebbe comunque essere acquisita tramite una calibratura di shunt periodica e controllando uno o più parametri ben definiti compreso la forza applicata allo zero. In questo caso l'utente potrebbe non possedere alcuna tracciabilità anche nel caso in cui la taratura iniziale è perfettamente riferibile allo standard.

2.11 La taratura delle celle di carico

2.11.1 I principi fondamentali

La relazione tra il carico applicato e la deflessione elastica di uno strumento di misurazione di una forza è, generalmente, non lineare. Nel momento in cui viene applicata la forza, le caratteristiche dell'elemento elastico cambiano progressivamente alterando la resistenza alla deformazione. Il risultato di ciò è che la pendenza della curva di deflessione varia gradualmente e uniformemente nell'intero range di misura dello strumento. La caratteristica non linearità full scale dello strumento è una proprietà stabile dello strumento stesso, che viene modificata solo da un severo sovraccarico o altri effetti simili.

Sovrapposte a tale curva ci sono poi le non linearità introdotte dalle imperfezioni nel sistema di indicazione della forza. Esempi di tali imperfezioni comprendono: la scala o il quadrante di indicazione non perfettamente graduati, il contatto irregolare tra le superfici della lamina vibrante e il bottone in un anello di prova e le instabilità nel voltaggio e nella sensibilità nelle celle di carico. Alcune di queste imperfezioni sono meno stabili della non linearità full scale e potrebbero variare in maniera significativa da una taratura all'altra.

Nel trattamento dei dati di taratura negli strumenti di misura delle forze di tipo elastico, si usa un metodo di predizione dei valori di deflessione all'interno dei limiti di incertezza basato su un polinomio di secondo grado adattato ai dati sperimentali tramite il metodo dei minimi quadrati. Tale equazione compensa la effettiva non linearità full scale facendo in modo da far venire fuori le non linearità localizzate come deviazioni dalla curva principale.

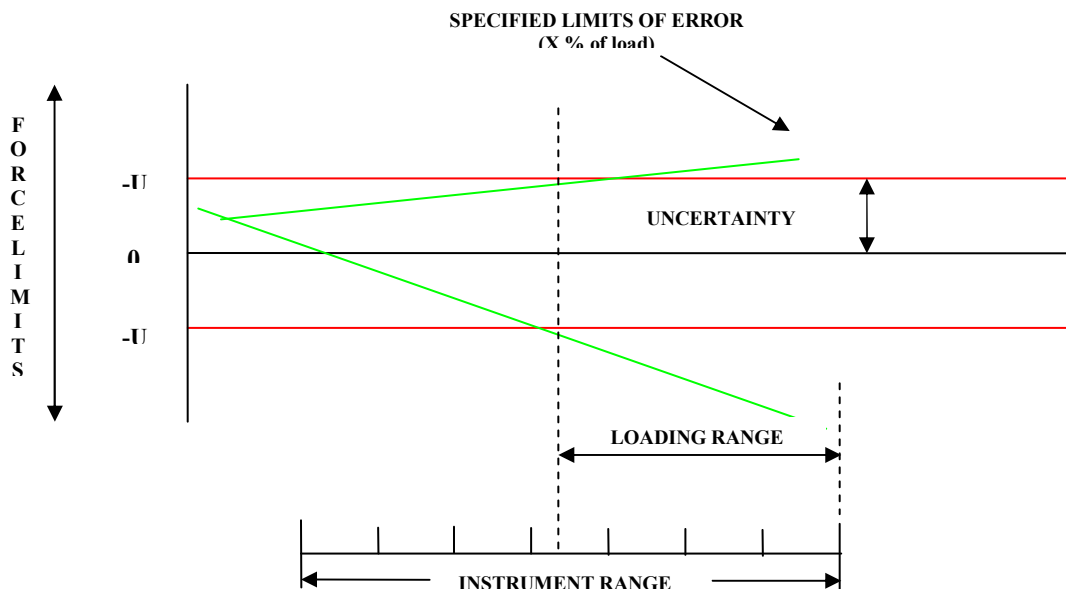


Fig. 2.2 - Relazione tra il range del carico applicato e l'incertezza strumentale con i relativi limiti di specifica e di errore

La stima di tipo statistico, che è proprio l'incertezza, è rappresentata dalla larghezza della banda di tali deviazioni sulla curva base (fig. 2.2). L'incertezza è, quindi, una stima dei limiti di errore apportati dallo strumento quando le forze applicate, misurate in esercizio, vengono calcolate con la media dell'equazione di taratura. Gli errori presenti in esercizio sono probabilmente molto maggiori se le forze vengono applicate in condizioni di carico e di ambiente diversi da quelli di taratura.

L'uso di equazioni di taratura di terzo, quarto o quinto grado è limitato a dispositivi aventi, in corrispondenza del massimo carico di calibrazione, una risoluzione di un incremento di cifra ogni 50000 o incrementi attivi ancora superiori.

2.11.2 La distribuzione delle forze di calibrazione

La distribuzione delle forze di calibrazione su tutto il range dello strumento deve essere fatta in modo tale da fornire, se possibile, almeno una forza di calibrazione ogni 10% dell'intervallo. Tuttavia non è necessario che queste forze siano equidistanti tra loro. Forze poste a limiti inferiori di 1/10 della capacità sono consentite, e tendono ad accrescere il fitting della curva di calibrazione. In nessun caso, comunque, la più piccola delle forze applicate deve essere inferiore al fondo scala teorico dello strumento come definito dai valori:

$$\begin{aligned} &400 \times \text{risoluzione, per classi di carico tipo A} \\ &2000 \times \text{risoluzione, per classi di carico tipo AA}^2 \end{aligned}$$

Un esempio di situazione da evitare è, nella taratura delle celle di carico, la selezione di forze la cui lettura si trova vicina ai punti che segnano i vari step. In questo modo non si riesce a campionare la curva e addirittura si confonde questa con gli incrementi degli intervalli.

La risoluzione di uno strumento digitale è considerata essere un incremento dell'ultima cifra significativa sull'indicatore, ammesso che la cifra non fluttui di più o meno un incremento in condizioni di assenza di carico. Se le letture fluttuano in tal modo, la risoluzione sarà uguale alla metà del range di oscillazione.

Per una calibrazione completa sono necessarie almeno n. 30 valori delle forze applicate e, di queste, almeno n. 10 devono essere di tipo diverso. Ognuna deve essere applicata almeno due volte durante la taratura.

² La classificazione ASTM è così definita. Sia U_e l'incertezza estesa della taratura di un Dinamometro. Diremo che il dinamometro tarato è: 1) di classe AA se $U_e < \text{Portata}/2000 = 0,05\% \text{Portata}$; 2) di classe A se $U_e < \text{Portata}/400 = 0,25\% \text{Portata}$.

2.11.3 La procedura di taratura in dettaglio

Immediatamente prima di cominciare la taratura, dev'essere applicato, per due volte, allo strumento di misura della forza un precarico di ampiezza pari al carico massimo. Il precarico è necessario per ristabilire i precorsi di isteresi che tendono a scomparire durante i periodi di disuso, ed è necessario seguire tutti i cambiamenti nel modo di caricare, dalla tensione alla compressione. Alcuni strumenti potrebbero richiedere più di due cicli di precarico per stabilizzarsi sullo zero.

Dopo questa fase, si applicano i carichi di calibrazione in maniera graduale. Tali forze dovrebbero essere applicati lentamente e uniformemente, onde evitare di indurre nello strumento di misurazione effetti di shock o vibrazioni. L'intervallo di tempo tra carico e scarico successivi, al fine di ottenere letture precise dallo strumento, dovrebbe essere il più uniforme possibile. Se un carico di taratura è seguito da un altro di ampiezza inferiore è necessario ridurre a zero il carico letto dallo strumento prima di applicare la seconda forza. Quando possibile, è opportuno programmare i carichi in modo tale da evitare che ripetizioni della stesa forza si susseguano in maniera consecutiva.

Il laboratorio che esegue la taratura può decidere se accettare o meno una lettura dello zero dopo ogni ciclo di carico. Fattori quali la stabilità della lettura e la presenza evidente di creep sotto carico devono essere tenuti in debita considerazione. L'operazione di rimuovere tutte le forze dallo strumento permette piccole correzioni alle superfici di contatto tra lo strumento e il pezzo, accrescendo il numero di campioni random e quindi producendo un apprezzamento superiore delle performance dello strumento. Si raccomanda di non superare l'applicazione di cinque forze incrementali senza il ritorno allo zero. Questo non è necessario quando lo strumento è tarato con forze di tipo decrescente. Tuttavia, ogni ritorno allo zero effettuato prima dell'applicazione di tutti gli incrementi di forza deve essere seguito dall'applicazione del carico massimo prima di continuare la sequenza.

2.11.4 Considerazioni sulla parte elettrica delle celle di carico

Eseguire un test di controllo su una cella di carico è estremamente facile. La procedura è semplice e l'attrezzatura necessaria minima. Se la cella è guasta dovrebbe essere rispedita al costruttore per maggiori indagini e potrebbe essere necessario ripararla. Prima di ciò, però, si possono effettuare dei controlli con un ohmmetro:

- ✓ Controllo del circuito del ponte e del bilanciamento dello zero. Si riporta qui un esempio di un ponte standard da 350 ohm.
 - Strumentazione necessaria è un ohmmetro con risoluzione nel range di 250-400 ohm.
 - Resistenza di input del ponte R_{AD} : dovrebbe essere tra $350 \pm 3,5$ ohm (a meno che la cella non abbia un "output standardizzato")

“Rated Output”³, nel cui caso la resistenza dovrebbe essere inferiore a 390 ohm).

- Resistenza di output del ponte R_{BC} : dovrebbe essere tra $350 \pm 3,5$ ohm.
- Resistenze ai piedi del ponte: confrontando le resistenze ai piedi in condizioni di assenza di carico permette la valutazione delle cause di ogni danno permanente alla flessibilità della cella. La condizione generale della cella sarà valutata in base allo squilibrio complessivo del ponte.
- Lo squilibrio complessivo, in mV/V, viene determinato come segue:

$$Squilibrio = 1,4 (R_{AC} - R_{AB} + R_{BD} - R_{CD})$$

- Lo zero offset, in unità di “% del segnale di output o *rated output*” viene calcolato come:

$$Zero\ Offset = 100 \times squilibrio \div rated\ output$$

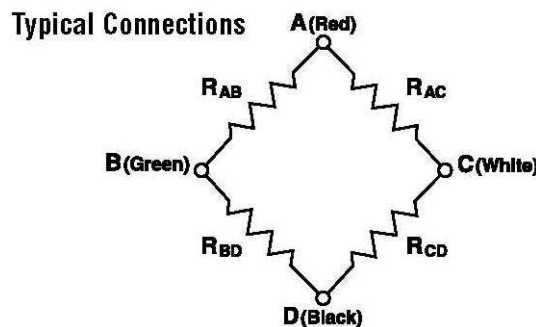


Fig. 2.3 - Tipico schema di collegamento di un ponte per cella di carico

Se la risoluzione dell'ohmmetro è 0,1 ohm o superiore, allora lo zero offset calcolato è maggiore del 20%, cosa che indica chiaramente una condizione di sovraccarico. Uno *zero balance* del 10-20% è indice di probabile sovraccarico.

Se la cella è stata sovraccaricata allora ci sono stati dei danni meccanici irreparabili perché il danno provoca deformazioni permanenti nell'elemento flessibile e negli estensimetri, distruggendo il bilanciamento globale degli elementi che poi garantiscono le performance del componente in questione. Sebbene sia teoricamente possibile riazzerare elettricamente una cella che ha subito sovraccarico, tuttavia ciò non è

³ Il Rated Output corrisponde alla Capacità ed è pari alla differenza algebrica tra il segnale in corrispondenza di (carico minimo+capacità) e quello in corrispondenza del carico minimo.

consigliabile, poiché ciò non pone riparo ai danni subiti da alcuni parametri e non supplisce alla degradazione dell'integrità strutturale.

Se il livello di sovraccarico non è severo, la cella potrebbe, in alcuni casi, essere usata a discrezione dell'utente, sebbene alcuni parametri potrebbero risultare fuori specifica e la durata a fatica risultare estremamente ridotta.

- ✓ Test di isolamento delle resistenze.
 - Isolamento delle resistenze, schermatura dei conduttori: si connettono tutti insieme i conduttori e si misurano le resistenze tra i cavi e gli schermi nel cavo.
 - Isolamento delle resistenze, flessibilità della cella ai conduttori: si connettono insieme tutti i conduttori e si misura la resistenza tra tutti i cavi e il corpo metallico della cella.

I test descritti possono essere realizzati con un ohmmetro standard, sebbene con un megohmmetro si ottengano risultati migliori. Se la resistenza si trova oltre il range standard dell'ohmmetro, circa 10 megohms, la cella probabilmente sta bene. Tuttavia, alcuni tipi di corti elettrici vengono alla luce solo usando un megohmmetro o comunque lavorando con voltaggi maggiori di quelli normalmente sopportabili da un semplice ohmmetro.

2.11.5 Il comportamento a fatica delle celle di carico

E' noto che i materiali metallici falliscono in condizioni di carico statico se si supera il limite di snervamento. Le celle di carico sono elementi strutturali che vengono molto stressati durante il loro normale utilizzo e per esse viene normalmente dato un valore di riferimento chiamato "ultimate overload", con lo scopo di caratterizzare l'ampiezza del carico statico che esse possono sopportare senza subire cedimenti strutturali. Tuttavia, tutte le strutture metalliche, comprese le celle di carico, sono anche soggette a rottura a causa di carichi ripetuti che sono di ampiezza di gran lunga inferiore al loro ultimate overload. Tale fenomeno è noto come rottura a fatica ed è dovuto al fatto che lo stress che un metallo può sopportare in condizioni di carico ciclico solitamente diminuisce al crescere del numero di cicli. La causa di questa apparente anomalia è facilmente spiegabile con il fatto che normalmente i metalli non sono dei solidi omogenei. Essi sono composti da cristalli e, nelle zone note come "bordi di grano" o lungo i piani di scorrimento in una zona di macroscopica difettosità, ci possono essere minuscole tensioni sotto carico che non si annullano completamente in fase di scarico, lasciando nella zona una deformazione plastica permanente alla fine di ogni ciclo di carico completo. Questo effetto è fortemente dipendente dall'ampiezza del carico e dal numero di cicli.

E' ben noto che un danno strutturale da fatica si sviluppa in tre stadi:

- ➡ Carichi ripetuti inducono deformazioni plastiche locali e danno origine ad una micro cricca.
- ➡ La cricca si propaga e un'ampia zona viene fessurata.

- La concentrazione delle tensioni nella zona della frattura cresce rapidamente e il continuo carico ciclico la espande fino al verificarsi della frattura.

La previsione accurata della vita a fatica di qualunque struttura non è generalmente possibile. Test ben controllati su configurazioni molto semplici di provini danno risultati distribuiti in una ampia fascia di valori. Con strutture complesse come quelle delle celle di carico l'analisi risulta molto articolata. La valutazione teorica può essere fatta con approssimazioni che possono fornire una utile stima del margine di sicurezza in corrispondenza del quale una particolare cella opera. Nella scienza dei materiali uno strumento utile è la ben nota curva S-N. Essa consiste nella rappresentazione grafica del numero di cicli di carico necessari alla rottura di un provino in corrispondenza di un range di picchi di carico. Tali curve, per materiali di alta qualità per celle di carico sono state ricavate sperimentalmente.

Sebbene il livello di carico dell'alluminio sia noto, la durata a fatica può essere nota solo approssimativamente. Tuttavia ci sono fattori influenti che risultano molto difficili da caratterizzare. Tali fattori includono la forma della curva di carico, la frequenza del ciclo di carico, tensioni residue, concentrazioni di tensione dovute alle caratteristiche del materiale, stato del carico, condizioni del materiale, dimensioni, metodo di fabbricazione, finitura superficiale, corrosione, temperatura di esercizio e ambiente di lavoro.

2.11.5.1 Modalità di rottura a fatica delle celle di carico

Ci sono due componenti metallici in una cella che devono essere considerati nell'analisi delle sollecitazioni a fatica: l'elemento flessibile (spring element) e l'estensimetro (sensore).

- l'elemento flessibile sorregge il carico, pertanto il suo cedimento è di tipo strutturale.
- l'estensimetro ha solo la funzione di trasformare in segnale elettrico le piccole deformazioni, per cui il suo cedimento non è di tipo strutturale. Il danno si presenta come un salto nella resistenza o del gage factor.

La tendenza ad incontrare per primo il cedimento dello spring element o dell'estensimetro dipende dalle modalità costruttive della cella stessa.

➤ *Gli elementi flessibili.*

Ci sono vari materiali usati per questo tipo di componente tra cui varie leghe di acciaio, acciai inossidabili e leghe di alluminio altamente resistenti a fatica. I grafici di tali materiali sono riportati nelle figg. 2.4 e 2.5 .

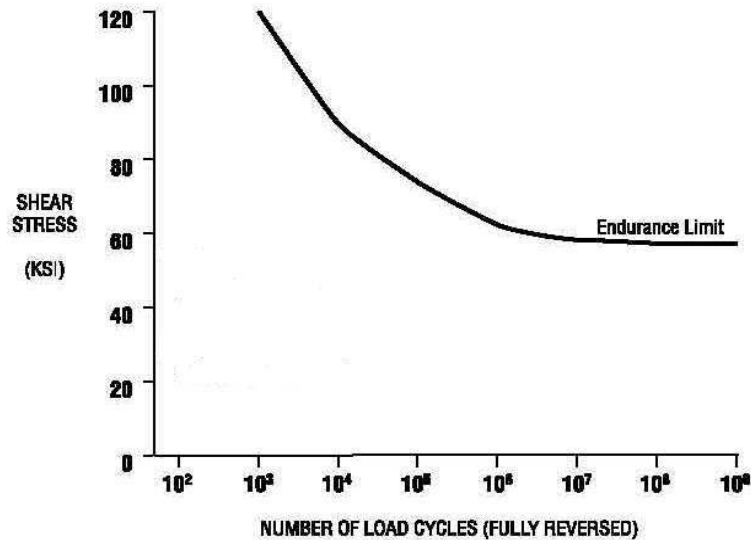


Fig. 2.4 - Curva S-N per una lega di acciaio e acciaio inossidabile usata per le celle di carico

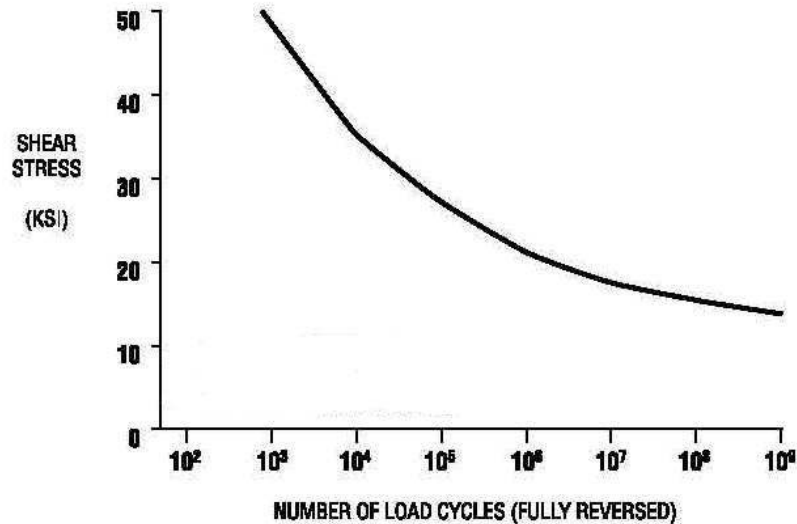


Fig. 2.5 - Curva S-N per l'alluminio usato nella costruzione di celle di carico

Il carico è normalmente espresso in psi (pounds per square inches), ma per convenienza spesso si trovano i ksi, che corrispondono a 1000 psi. Lo sforzo di taglio è sull'asse verticale e corrisponde allo stato di carico delle celle a basso profilo. Da una attenta osservazione si può notare che la classica resistenza a fatica per questi materiali è superiore rispetto a quella rappresentata in figura. Questo perché normalmente i dati forniti si riferiscono alla flessione o allo sforzo normale, mentre questo particolare

tipo di cella lavora a taglio. Ciò comporta il vantaggio di usare il fattore di taglio appropriato evitando di incappare in falsi risultati troppo ottimistici. Si noti che la curva S-N per l'acciaio diventa praticamente costante a circa 55 ksi. Questa è una nota caratteristica dell'acciaio che presenta andamento costante in corrispondenza del limite di incrudimento. Se si opera al di sotto di tale limite il materiale dovrebbe, teoricamente, avere durata infinita.

In generale i materiali non ferrosi non esibiscono un limite di incrudimento ma hanno curve che continuano a scendere con una modesta pendenza.

➤ **Gli estensimetri.**

Le caratteristiche a fatica degli estensimetri vengono meglio rappresentate in termini di deformazioni anziché di carico. La fig. 2.6⁴ mostra una curva Strain-N (deformazione-numero di cicli) per un estensimetro in lega nikel-cromo. La deformazione è adimensionale, di ampiezza molto piccola. Si usa, per comodità, l'unità di microstrain che è semplicemente 10⁻⁶ unità di strain.

Carico e deformazione per ogni tipo di materiale sono legati tra loro dal modulo di elasticità di Young (approssimativamente pari a 30×10^6 per gli acciai e 10×10^6 per l'alluminio).

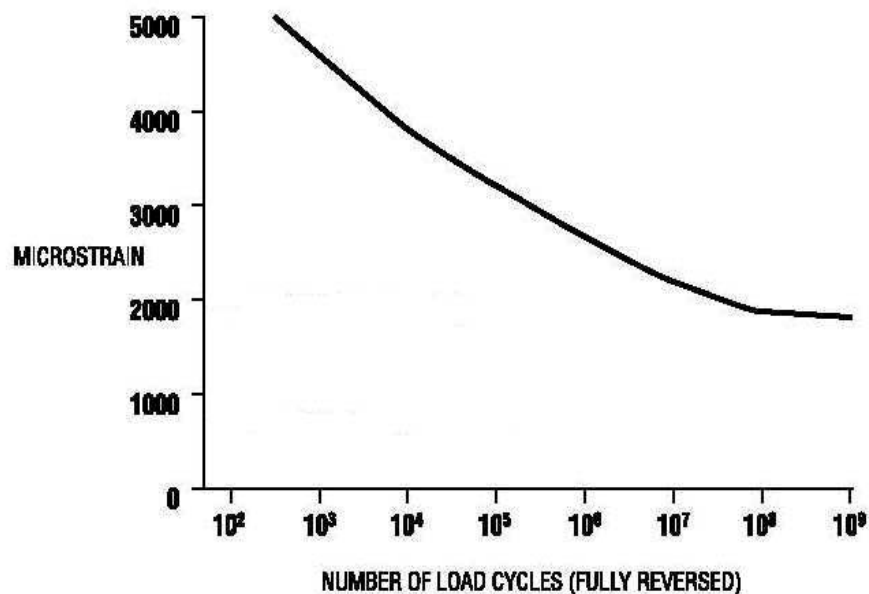


Fig. 2.6 - Curva Strain-N per estensimetri in lega nikel-cromo

⁴ Le curve nelle figure 3.4, 3.5, 3.6 sono per cicli “fully reversed” cioè ogni ciclo di carico comincia dallo zero e va in valori positivi, poi ritorna allo zero e applica il corrispondente carico in negativo.

2.11.6 Risoluzione delle celle

Le celle in commercio vengono costruite, nella maggior parte dei casi, usando estensimetri con una resistenza elettrica a foglio metallico.

La cella è un dispositivo analogico con una risoluzione costante limitata dal rumore dovuto alla mobilità degli elettroni dell'ordine dei 10^{-9} volt (1 nanovolt). In pratica, la risoluzione è limitata maggiormente dal tipo e dalla qualità della strumentazione elettronica usata, piuttosto che dalla cella in sé e per sé. Molti strumenti, chiaramente costosi, possono avere come livello di segnale minimo valori da 0,8 a 1,0 microvolt/count.

Per esempio, si consideri una cella di carico con un Rated Output di 3mV/V e si assuma di utilizzare una tensione di eccitazione di 10 VDC. In corrispondenza del rated output il livello di segnale prodotto sarà:

$$3 \text{ mV/V} \times 10\text{V} = 30\text{mV}.$$

Se lo strumento di lettura può apprezzare i microvolt nell'ultima cifra alla destra del display allora:

$$\text{Risoluzione} = \frac{1\mu\text{volt}}{30\text{mV}} = \frac{1\mu\text{volt}}{30,000\mu\text{volt}} = 0.000033, \text{ frazione di rated output} = 0.0033\% \text{ di Rated Output.}$$

Se si usa una cella di 5 lbf di Rated Capacity la risoluzione può essere ottenuta in pound calcolando:

$$\text{Risoluzione} = 5 \text{ lbf} \times 0.000033 = 0.00017 \text{ lbf}.$$

Da questo esempio si nota l'importanza della sensibilità e della stabilità della strumentazione elettronica, soprattutto nei casi in cui viene richiesta una elevata risoluzione.

Le elevate capacità della strumentazione elettronica da sole non portano comunque a buoni risultati, se non accompagnate dalla stabilità dello zero e delle cifre, poiché le letture saranno variabili col tempo e con la temperatura. D'altra parte, una risoluzione eccessiva può essere controproducente quando si ha una poca stabilità della forza applicata e in alcuni particolari sistemi idraulici.

In generale, si preferisce leggere le unità anziché i counts. Molti strumenti forniscono un "count per caratteristiche" di 1, 2, 3 o 10. Per l'esempio precedente, uno strumento potrebbe essere settato per leggere 30,000 counts per 2 dei 3 pound di carico fornendo una risoluzione di 0.0002 lbf.

2.11.7 Tensione di eccitazione

Normalmente, le celle di carico vengono calibrate con una tensione di eccitazione di 10VDC. Sebbene le celle a basso profilo possono operare con tensioni superiori a 20VDC e le mini serie anche con 15VDC, è sempre meglio operare con celle dello stesso voltaggio usato per la calibrazione perché alcuni parametri vengono influenzati dal voltaggio applicato.

La costruzione base di una cella consiste in estensimetri fissati all'elemento flessibile della cella con uno strato sottilissimo di resina epossidica elettricamente isolante. Tipicamente, si usano quattro estensimetri collegati ai rami di un ponte di Wheatstone. Quando viene applicata la tensione elettrica al ponte, la corrente attraverso ogni estensimetro genera calore che viene trasmesso alla massa flessibile attraverso la resina epossidica. Perciò la temperatura del ponte è sempre leggermente superiore di quella dell'elemento flessibile durante il normale funzionamento.

- **Riscaldamento degli estensimetri.** Per ogni 350 ohm un ramo del ponte dissipa più di 71 milliwatts a 10VDC di eccitazione. Finché la potenza si mantiene proporzionale alla radice quadrata del voltaggio, il ramo dissiperà più di un quarto di watt a 20 VDC, ma solo 18 milliwatt a 5 VDC.
- **Bilanciamento dello zero.** Piccole differenze del coefficiente di temperatura delle resistenze in ogni ramo del ponte provocano lo scostamento dello zero al variare della temperatura degli estensimetri. Tale effetto è solitamente limitato. Per esempio, una variazione di tensione da 10.00 VDC a 12.25 VDC causerà uno shift dello zero inferiore allo 0.0014% del rated output.
- **Sensibilità.** Il gage factor di ogni estensimetro viene corretto per compensare l'influenza del coefficiente di temperatura del modulo dell'elemento flettente. Questa operazione è perfettamente valida solo per tensioni di 10 VDC. Un aumento di tensione a 10.25 VDC abbasserebbe la sensibilità del ponte di solo 0.001%, ma l'utilizzo di 20 VDC di tensione causerà una diminuzione di sensibilità, in una cella a basso profilo, dello 0.07%, il che potrebbe essere molto significativo. Tensioni di 20 VDC applicate alle celle di serie mini causerebbero gravi effetti dovuti al riscaldamento degli estensimetri e potrebbero persino ridurre la vita della cella stessa.
- **Creep.** Il creep è influenzato dalla temperatura, ma non se ne può predire né la intensità né la direzione dell'effetto. Alla temperatura ambiente, variando la tensione applicata da 10.00 VDC a 10.25 VDC non si ha alcun effetto considerevole. Tuttavia, aumentando il voltaggio su una cella a basso profilo fino a 20 VDC, si provocherà un aumento (o diminuzione) dell'effetto del creep del 10% rispetto a quello specificato.

Se la stabilità alla temperatura è buona, allora degli shift di una certa rilevanza verranno rilevati come shift di tipo parametrico e non sono normalmente rilevabili nelle normali applicazioni. Tuttavia, in situazioni in cui la cella dev'essere usata come standard di riferimento per taratura, o nei casi in cui è assolutamente necessaria la stabilità delle caratteristiche funzionali, si devono adottare delle precauzioni per assicurare la stabilità della tensione di eccitazione.

2.11.8 Compensazione del momento

Il problema che qui si affronta è quello di essere sicuri di avere una lettura della forza accurata. In molte applicazioni è difficile, se non impossibile, calcolare o perfino stimare l'effetto del disallineamento sulla precisione di un sistema di misura di forza. La sensibilità al momento introduce errori nella misura delle forze tutte le volte in cui una forza non possa essere applicata precisamente lungo un asse. Alcune celle di buona qualità hanno la capacità intrinseca di eliminare i carichi da momento grazie alla loro struttura radiale e grazie ad alcune particolari caratteristiche quali:

- I componenti di flessione radiale vengono macchinati in maniera precisa per bilanciare il carico assiale.
- Gli estensimetri vengono incollati in maniera precisa in modo tale che le deformazioni dovute ai carichi assiali siano additivi e quelli dovuti al momento tendano a scomparire sotto il carico da momento attuale.
- Alcune celle usano otto estensimetri anziché quattro in modo tale da minimizzare l'errore provocato da carichi non perfettamente allineati.
- Piccole discrepanze tra l'output dell'estensimetro vengono attentamente misurati e ogni cella viene ricalibrata per ridurre la futura sensibilità a carichi estranei.

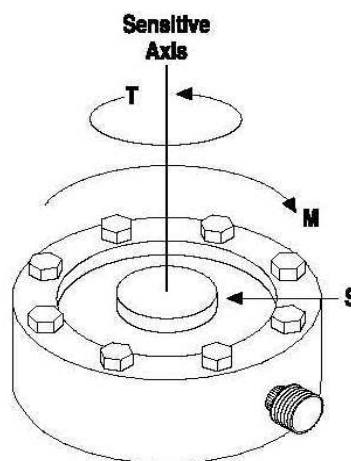


Fig. 2.7 - Compensazione del momento nelle celle di carico

2.11.9 Compensazione dello zero della temperatura

Il bilanciamento dello zero della temperatura per le celle di carico è convenzionalmente realizzato col metodo “chord-slope”.

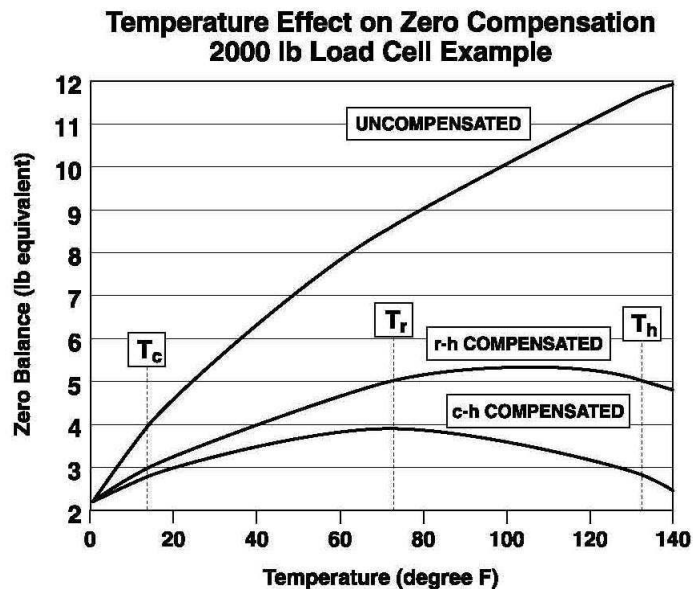


Fig. 2.8 - Compensazione dello zero di temperatura

Più comunemente, si usa una implementazione parziale di questo metodo (partial-range), ponendo una linea tra la temperatura ambiente e il punto alla temperatura massima. Una migliore applicazione si ottiene lavorando col full-range, usando tre temperature di prova e tirando una linea tra gli estremi più freddo e più caldo.

La curva superiore del grafico in fig. 2.8 rappresenta le caratteristiche dello zero di temperatura di una cella non compensata. Tale curva sarebbe idealmente una retta ma spesso presenta delle non linearità, come nel nostro caso.

Lo scopo del processo di compensazione della temperatura è quello di far ruotare la curva in una posizione più livellata. La curva di mezzo rappresenta una compensazione basata sulla temperatura ambiente (T_r) e a temperatura alta (T_h) ed è quindi chiamata curva “compensata r-h”. Il processo compensa i valori di bilanciamento dello zero in corrispondenza di T_r e T_h . La curva inferiore rappresenta una compensazione fatta a temperatura bassa (T_c) e alta (T_h) ed è per questo chiamata cura “compensata c-h”. Questa procedura compensa i valori di zero in corrispondenza di T_c e di T_h producendo una soluzione full-range relativamente buona.

E' quindi chiaro il motivo della superiorità del metodo full-range:

1. La pendenza della caratteristica vicino alla temperatura ambiente, temperatura alla quale lavorano la maggior parte dei dispositivi in commercio, è quasi nulla.
2. Il range totale del bilanciamento dello zero all'interno dell'intero range di temperatura nel diagramma è minimo, approssimativamente metà della curva compensata con il metodo partial-range, in questo esempio.

2.12 Taratura a pesi morti

Si descrive qui la procedura di taratura di sensori con il metodo dei pesi morti (o *dead weights*), facendo notare i tipici errori commessi che si riflettono poi su un risultato scorretto.

La calibrazione e la compensazione della temperatura dei sensori di pressione basati sugli estensimetri sta diventando sempre più di uso comune. Fornitori di case automobilistiche e di prodotti di sicurezza, ad esempio, stanno incrementando l'uso dei sensori di forza per ottimizzare le prestazioni nello scoppio di un airbag appropriato alla massa del passeggero e alla gravità della situazione di intervento. Purtroppo, anche con l'uso di alte risoluzioni di calibrazione, non si riescono a compensare gli effetti dovuti a procedure di taratura e di setup di prova scadenti. I punti cardine da tenere in considerazione nella taratura dei sensori di peso vengono qui elencati insieme alle operazioni funzionali chiave da svolgere nella prova. Verrà qui trattato un tipico sistema di prova a pesi morti per la caratterizzazione e la produzione di un prototipo, perché questo tipo di procedura si applica molto frequentemente in questo campo.

La caratterizzazione di un tipico sensore di peso richiede l'uso di un banco di prova a peso morto (chiamato anche creep-tester), al fine di ottenere carichi sul sensore che siano accurati e ripetibili. Si devono osservare diversi punti prima di arrivare al risultato desiderato.

- Orientamento del fissaggio per carichi positivi e negativi sul banco di prova;
- Orientamento dei sensori e dei cavi;
- Torsione dei dadi di fissaggio;
- Numerazione dei carichi;
- Gioco tra l'asta e il peso (nei casi in cui si usino delle macchine di sollevamento per rimuovere la massa dalla condizione di carico)
- Pre condizionamento e fissaggio dei sensori dopo il montaggio
- Monotonia nella applicazione e rimozione dei carichi
- Campioni di riferimento e tracciabilità dei dati (SPC)

2.12.1 Orientamento del fissaggio

L'orientamento tipico del fissaggio per un sensore di peso flesso ad S doppiamente bloccato è mostrato in fig. 2.9. L'estensimetro A si trova in tensione e quello B in compressione. La condizione di scarico non è attualmente zero, ma ha un valore positivo dovuto al peso del sensore a trave e al peso del sistema di bloccaggio (incluso l'asta filettata, catene e piatto di pesatura).

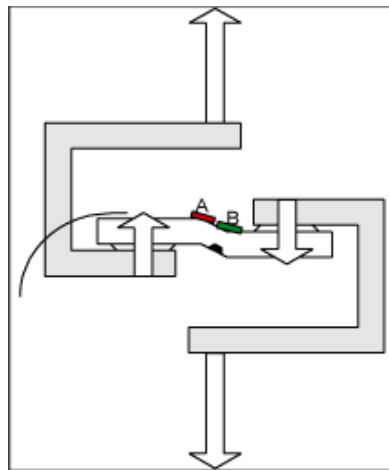


Fig. 2.9 - Orientamento del fissaggio per applicazione di carichi positivi

L'orientamento tipico per il fissaggio in caso di carico negativo viene mostrato in fig. 2.10. L'estensimetro A si trova ora in compressione e quello B in trazione. Ciò produce un output di segnale negativo.

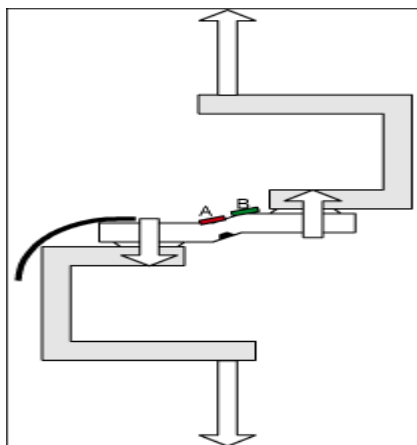


Fig. 2.10 - Orientamento del fissaggio per carichi negativi

L'orientamento del sensore non varia. Tuttavia i fissaggi adesso sono lunghi circa 1 inch. Questo orientamento del sistema di fissaggio si ottiene rimuovendo i morsetti a C e fissandoli verticalmente e ruotandoli orizzontalmente.

La condizione di scarico non è ancora zero ma ha un valore negativo dovuto al peso del sensore a trave e al peso del sistema di bloccaggio.

Questa condizione di scarico è esattamente la stessa del caso di scarico in positivo, ma di segno contrario.

Esisteranno sempre quattro condizioni di carico nel ciclo da zero carico a carico positivo, zero carico a carico negativo. Infatti definiremo le condizioni di zero carico come +zero carico e -zero carico. Nella fig. 2.11 è mostrato un sistema di fissaggio scorretto, in cui il sensore è stato fissato e ruotato, ma il sistema di fissaggio è rimasto lo stesso. A prima vista, ciò potrebbe far pensare alla semplice applicazione di un carico negativo, ma, dopo una attenta ispezione degli estensimetri A e B, si nota che questi ultimi presentano la stessa configurazione di tensione/compressione di Fig. 2.9 e producono un segnale in output dello stesso segno.

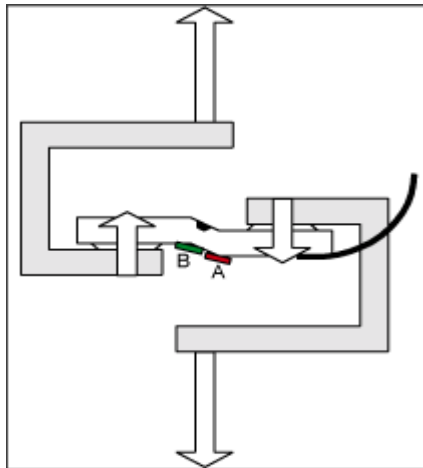


Fig. 2.11 - Orientamento scorretto del sistema di fissaggio per applicazione di carico negativo

2.12.2 Orientamento del sensore e dei cavi

Mantenere il sensore nello stesso orientamento per tutte le prove è importante per due ragioni. La prima è che il corpo del sensore è caricato come una trave a sbalzo. Nonostante il fissaggio a doppia S tenda a cancellare gli effetti comuni di questo tipo di trave, è buona norma non fare affidamento su un solo sensore per tale eliminazione, quando il semplice orientamento del fissaggio cancella tutti i problemi. Secondo, il peso e la tensione del cavo produrranno carico. Sebbene il contributo all'errore sulla condizione di zero sia minore, può essere comunque eliminato fissando per bene il cavo. Il fissaggio ottimale si ottiene quando il cavo è auto sorretto o sostenuto dal lato non attivo (cioè non sottoposto a carico) del sensore. Questo lato è quello in cui viene fissato il morsetto a C e che corrisponde alla parte superiore della macchina di prova.

La fig. 2.12 mostra sia il montaggio corretto che quello scorretto del cavo. Il semplice montaggio di una clip ad elica montata sulla staffa superiore fornisce un rapido sistema di connessione del sistema di cavi.

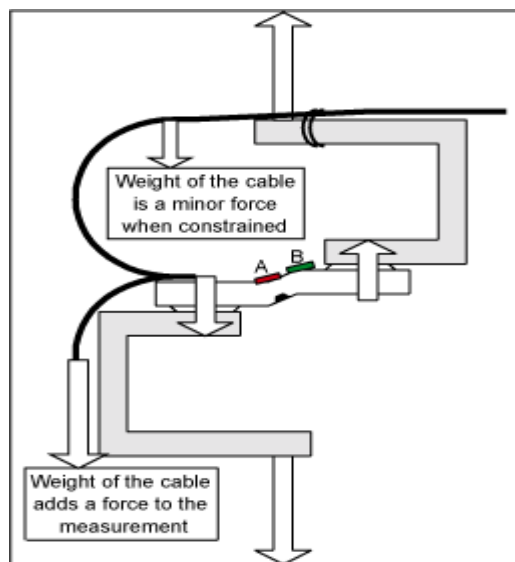


Fig. 2.12 - Schema di montaggio corretto e scorretto del cavo; quello corretto è nella parte superiore

2.12.3 Numerazione dei carichi

Tutti i pesi non si creano uguali tra loro. Generalmente i pesi morti sono tracciabili allo standard primario del NIST, tramite secondari, o, tramite terziari,



Fig. 2.13 - Variazione dell'output del sensore provocata da un carico disomogeneo applicato in sequenza random

attraverso laboratori di calibratura qualificati. Qualche volta i pesi poco costosi non sono del tutto tracciabili e possono differire in peso anche del 10% l'uno

l'altro. In ogni caso, i pesi dovrebbero essere contrassegnati da un numero di identificazione unico sulla superficie sporgente in modo tale da poter essere applicati e rimossi in sequenza ripetitiva.

I pesi non uguali risulteranno in una leggera non monotonia di applicazione della forza al sensore. Quando tali pesi sono applicati in ordine casuale, il risultato è una curva di output del sensore che è non ripetibile rispettando la linearità. Ciò viene mostrato in maniera esagerata in fig. 2.13. Come affermato prima, sebbene questa variazione casuale dell'errore sia minore, esso assume importanza rilevante se i pesi sono applicati nella stessa sequenza ogni volta.

2.12.4 Gioco asta-peso

Quando si usa un meccanismo di sollevamento del peso, si richiede un controllo accurato della posizione dell'asta dentro gli slots del peso. La fig. 2.14 mostra i pesi con le fessura per il carico e lo scarico dei pesi. Quando il sollevatore di peso viene mosso per rimuovere la massa dal sistema di fissaggio, ogni contatto tra l'asta filettata e la scanalatura del peso provocherà isteresi e/o una misurazione ingannevole della condizione di zero carico.

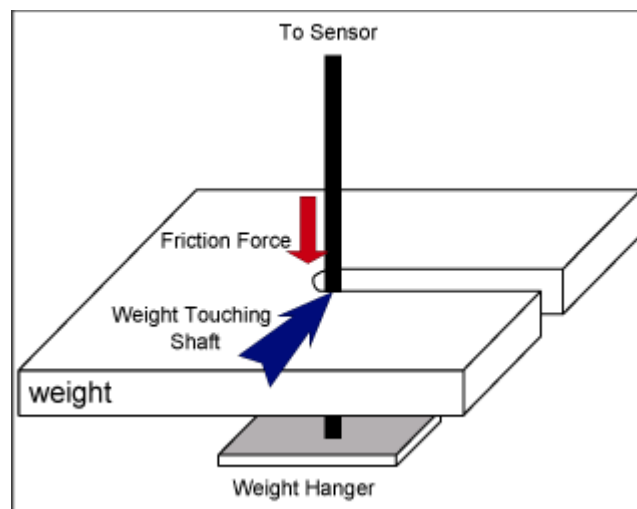


Fig. 2.14 - Contatto tra il peso e la barra di fissaggio

Una condizione altresì importante è l'utilizzo di macchine di test a peso morto per i test di creep. Il test di creep di un sensore di forza ha lo scopo di misurare lo shift dell'offset semi permanente che si verifica quando un sensore è soggetto ad un carico in una data direzione per un lungo periodo di tempo o a temperature estreme. Il creep viene mostrato graficamente in fig. 2.15. Una prova di creep dovrebbe includere la misurazione dello zero di carico (dopo un adeguato preconditionamento), il monitoraggio continuo delle misure di carico in fase di

test e la misura della condizione di zero carico finale e delle relative caratteristiche associate.

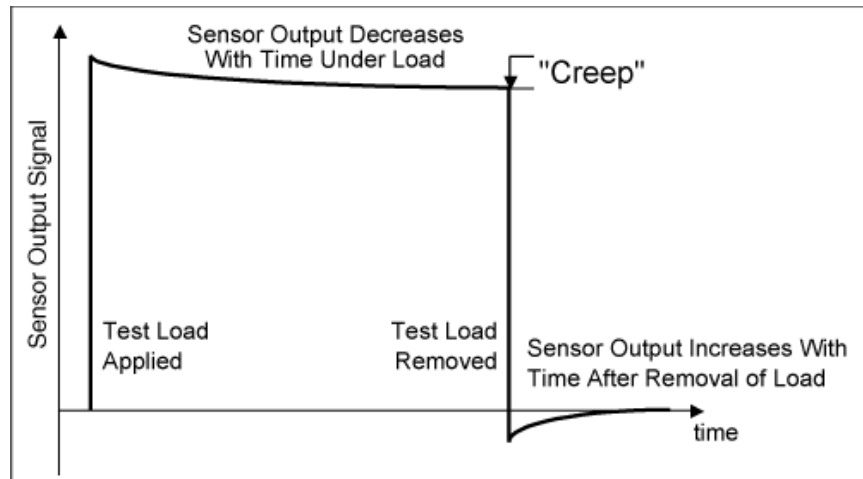


Fig. 2.15 - I test di misurazione del creep richiedono la accurata applicazione della condizione di zero carico

2.12.5 Pre condizionamento del sensore e dei fissaggi dopo il montaggio

Il sensore e il sistema di fissaggio devono essere ripetutamente caricati fino al full scale e scaricati fino allo zero per tre volte dopo il montaggio di ogni sensore, dopo l'avvitamento di ogni singolo dado e dopo prove abortite. La ragione di ciò è che c'è una piccola componente di attrito intorno ad ogni superficie di contatto fissaggio-sensore che potrebbe leggermente alterare il profilo di carico in corrispondenza del montaggio del sensore. Quando vengono applicati i carichi questa zona di contatto scivola in un punto più stabile tra la condizione di pieno carico e completo scarico. Lo stesso sensore mostrerà una tensione nello strato protettivo di polimero che riveste gli estensimetri. Caricando con tre cicli, si eliminano queste tensioni e si stabilisce uno zero di carico in uscita dal sensore, che è reale, e si può cominciare la prova in tranquillità.

Un fenomeno collegato a questo è l'isteresi di un insieme di estensimetri quando vengono ciclicamente caricati dallo zero al pieno carico. Sebbene tale tipo di isteresi provochi un errore inferiore allo 0,01%, è comunque una fonte di errore nota e quindi dovrebbe essere eliminata ove possibile. Ciò viene fatto usando la procedura di tre cicli a full scale indicata sopra e applicando tale procedura ogni volta che una sequenza viene fermata ad un determinato livello di carico e poi ripresa.

2.12.6 Applicazione e rimozione del carico in maniera monotona

Durante una sequenza di prova i pesi dovrebbero essere applicati in maniera incrementale continua in fase di carico e rimossi in maniera decrescente continua in fase di scarico. Ciò evita interferenze con il ciclo di isteresi formatosi nei tre cicli di pre condizionamento sopra menzionati. La sequenza è mostrata in fig. 2.16.

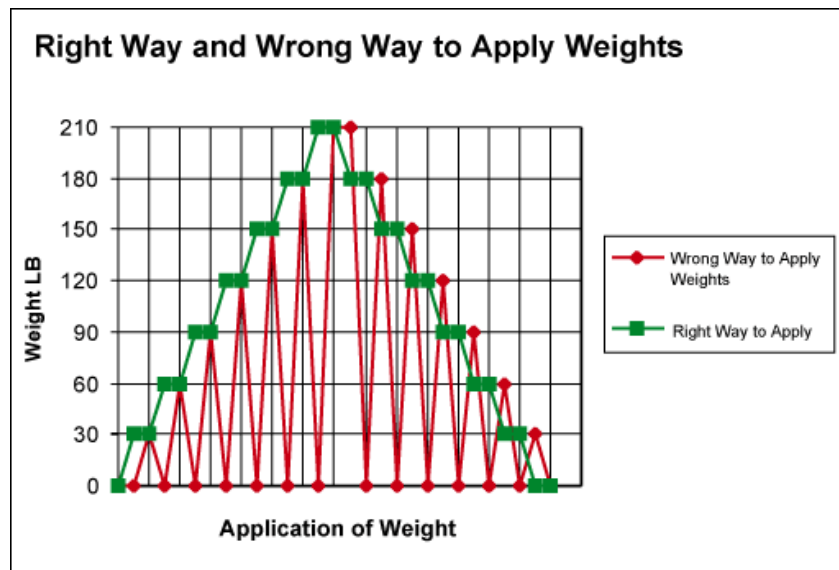


Fig. 2.16 - Applicazione dei carichi sempre in maniera crescente o decrescente

I carichi dovrebbero anche essere applicati in maniera attenta in modo da non indurre carichi eccessivi sul sensore, lasciando cadere inavvertitamente il peso nel sistema di fissaggio. Un carico di 30LB può produrre centinaia e perfino migliaia di punti di forza quando viene lasciato cadere in questo modo. Stabilizzando i pesi del fissaggio prima di effettuare le letture delle misure è anche più semplice quando i pesi vengono applicati in maniera attenta.

2.13 Campioni primari e tracciabilità dei dati

Il gruppo di test o l'assicurazione di qualità dovrebbero conservare un campione primario dei sensori (con o senza la strumentazione elettronica) per la conferma o la validazione dell'adeguatezza all'uso dei banchi di prova. Questi campioni dovrebbero essere periodicamente tarati sul banco di prova e i dati registrati in un archivio.

La licenza dell'attrezzatura di prova dovrebbe essere rilasciata solo dopo che sono stati fatti i confronti con il campione primario e si siano ottenuti risultati accettabili. Questo archivio diventa la base per la tracciabilità al primario delle

capacità dell'attrezzatura durante tutta la vita dell'apparecchiatura. I campioni primari dovrebbero essere usati quando si presentano una delle seguenti condizioni:

- Il banco di prova viene spostato
- Il banco di prova o i sistemi di fissaggio vengono modificati e/o sostituiti
- I pesi vengono sostituiti o modificati
- Prima di effettuare test su sensori per uso privato, progetto o verifica di processo di prova
- Controlli di riproducibilità tester-tester

2.14 Analisi dei dati

Deflessione

Lo scopo di questa applicazione è quello di calcolare i valori di deflessione per lo strumento di misura di una forza, come differenza tra la lettura dello strumento sotto il carico applicato e la media delle letture in corrispondenza di assenza di forza prese prima e dopo ogni ciclo di carico. Se si prende una serie di letture di forze incrementali senza ritorno allo zero, si può usare per tale calcolo una serie di interpolazioni di letture a carico nullo. Nel calcolo della media delle letture a carico nullo e delle deflessioni, si devono esprimere i valori alla cifra più prossima all'unità e nella stessa posizione di cifra della lettura della scala dello strumento.

Equazione di calibrazione

Si usa adattare ai valori di deflessione della forza ottenuti nella calibrazione, usando il metodo dei minimi quadrati, un'equazione polinomiale nella forma seguente:

$$deflessione = A_0 + A_1F + A_2F^2 + + A_5F^5$$

dove F è la forza e le A sono dei coefficienti.

Si raccomanda l'uso di una equazione di secondo grado con A_3 , A_4 e A_5 uguale a zero. Si possono anche usare equazioni di altri gradi ed esiste una procedura nell'ASTM E74 per calcolare l'equazione polinomiale di best fit per i dati a nostra disposizione. A seguito della determinazione di tale equazione, si inseriscono i dati di calibrazione raccolti in una equazione polinomiale dello stesso grado della precedente e si procede all'analisi dei dati.

Si calcola la deviazione standard a partire dalle differenze tra i singolo valori osservati nella calibrazione e i corrispondenti valori presi dall'equazione di calibrazione, come segue:

$$\text{Deviazione standard} = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{(n - m)}},$$

dove d_1, d_2, d_3 , etc. sono le differenze tra la curva adattata agli n valori osservati e i dati di calibratura, n è il numero di valori di deflessione ed m è il numero di gradi di libertà del polinomio, solitamente il grado del polinomio più uno.

In questo caso, l'incertezza viene definita come 2,4 volte la deviazione standard. Se l'incertezza calcolata è inferiore alla risoluzione dello strumento, viene considerata uguale al valore della risoluzione. Tale incertezza verrà espressa in unità di forza, usando il valore medio della forza che provoca deflessione preso dai dati acquisiti.

Range di carico

Rappresenta il range di forze in cui l'incertezza dello strumento di misura della forza non supera i massimi limiti di errore permissibili, specificati come frazione percentuale della forza. Finché l'incertezza dello strumento si riferisce a forza di ampiezza costante in tutto il range di misura dello strumento, esso sarà tipicamente inferiore della specificata percentuale di forza alla predefinita capacità dello strumento, ma supererà tale percentuale in alcuni punti nella zona inferiore dei carichi, come illustrato nella fig. 2.2.

Il range di carico mostrato in figura si estende dal punto A, in cui si intersecano le rette limite dell'incertezza e dell'errore, fino alla capacità dello strumento. Il range di carico non dovrebbe comprendere forze esterne rispetto a quelle applicate nella calibrazione.

Limite inferiore del range di carico e standards di carico

Il calcolo dell'estremo inferiore per una specifica percentuale di limite di errore P si esegue come segue:

$$\text{limite inferiore} = \frac{100 \cdot \text{incertezza}}{P}$$

Gli standards di carico sono elencati in seguito, ma non sono gli unici in quanto in casi speciali se ne potrebbero usare di diversi.

- Classe AA: per strumenti usati come campioni secondari, l'incertezza dello strumento non deve superare lo 0,05% della forza. Il limite inferiore di forza dello strumento è 2000 volte il valore dell'incertezza, espressa in unità di forza, ottenuta dai dati di calibrazione.
- Classe A: per gli strumenti usati per verificare le macchine di prova in accordo con la ASTM E74, l'incertezza dello strumento non deve superare lo 0,25% della forza. Il limite inferiore di forza dello strumento è 400 volte

il valore dell'incertezza, espressa in unità di forza, ottenuta dai dati di calibrazione.

L'ampiezza dell'incertezza e il limite inferiore dei range di carico che determinano la conformità a questo standard sono quantità derivate basate su analisi statistiche dei dati di calibrazione. L'incertezza calcolata è, come già detto, 2,4 volte il valore della deviazione standard. In funzione della probabilità, questi limiti stanno a significare che, con una percentuale del 99%, l'errore non supererà il valore di incertezza fissato.

Qualunque dispositivo di misura di forza potrebbe essere tarato per uno specifico dispositivo di forza. Anelli elastici, maglie chiuse e colonne con quadranti che indicano la media della deformazione sensibile vengono generalmente classificati come dispositivi di forza speciali a causa del fatto che la loro non linearità localizzata molto accentuata, introdotta dal sistema di indicazione, produce una incertezza adeguata al range di carico. Tali strumenti sono quindi usati applicando solo forze pari a quelle di taratura e il fitting della curva, nonché le procedure analitiche standard sono sostituite dalle seguenti:

Calcolo della forza nominale di deflessione. A partire dai dati di calibrazione si calcola il valore medio delle deflessioni corrispondenti al carico nominale. Se le forze di calibrazione sono diverse da quelle nominali, come può succedere nel caso di taratura con campioni secondari, si adattano i valori delle deflessioni osservate a quelli corrispondenti alla forza nominale tramite interpolazione lineare fornita dal fatto che la differenza di carico non supera il $\pm 1\%$ della capacità della forza. Il valore medio della deflessione a carico nominale è il valore di calibrazione per quella particolare forza.

La deviazione standard per un particolare dispositivo di forza. Il range delle deflessioni al carico nominale si calcolano come differenza tra la deflessione massima e quella minima, per il carico assegnato. Si moltiplica, poi, il valore medio di tutti i range per tutte i carichi di calibrazione, con l'appropriato fattore scelto dalla tab. 2.3, per ottenere la deviazione standard stimata di una singola deflessione rispetto al valore medio.

Tab. 2.3 - Stime della deviazione standard da range appartenenti a piccoli campioni

Numero di osservazioni per ogni carico	Fattore moltiplicativo per il range
3	0,591
4	0,486
5	0,430
6	0,395

2.14.1 L'incertezza per particolari dispositivi di forza

L'incertezza per dispositivi di misura di forza particolari è definita come 2.0 volte la deviazione standard più la risoluzione. Conviene convertire l'incertezza in unità di forza attraverso i valori medi di un opportuno fattore e arrotondare il tutto al numero di cifre significative appropriato alla risoluzione disponibile. L'incertezza viene espressa come:

$$incertezza = (2s+r)f$$

in cui:

s = deviazione standard

r = risoluzione

f = valore medio della forza di deflessione preso dai dati di calibrazione.

Uno specifico dispositivo di forza non possiede uno specifico range, come già visto, e quindi può essere usato solo applicando forze della stessa entità di quelle di calibrazione. L'utilizzo è limitato, tuttavia, a quelle forze di calibrazione che sarebbero comprese nel range calcolato nel paragrafo precedente.

CAPITOLO 3

MISURA E INCERTEZZA**3.1 Generalità**

Una delle operazioni più importanti nell'esecuzione di una misurazione è un'accurata stima dell'incertezza, ossia dell'indeterminazione con la quale si viene a conoscere il valore del misurando, che deve sempre essere comunicata insieme al dato misurato: una stima per difetto porta ad assegnare alla misura una significatività maggiore di quella effettiva, con i conseguenti problemi di natura tecnica e/o legale; d'altra parte, una stima per eccesso sminuisce la qualità della misura, ottenuta, eventualmente, con l'impiego di apparecchiature costose e metodi complessi.

In ogni caso, è importante evidenziare il fatto che l'incertezza di una misura NON può essere resa nulla, in quanto:

- le apparecchiature ed i campioni impiegati per eseguire la misurazione non sono ideali;
- l'interazione tra le apparecchiature ed il sistema misurato altera lo stato del sistema stesso, per cui la misura ottenuta sarà comunque diversa da quella a vuoto;
- le misure delle grandezze di influenza e delle grandezze che definiscono lo stato del sistema sono caratterizzate da un'incertezza non nulla;
- la definizione del misurando, per quanto complessa, non può essere esauriente.

3.2 Classificazione dei metodi di misurazione

Una prima classificazione dei metodi di misurazione, che è basata sul numero di letture eseguite per assegnare un valore al parametro da misurare, permette di distinguere tra:

- metodi di misurazione a lettura singola, nei quali la misura è assegnata in seguito all'esecuzione di una singola lettura su ciascuno degli strumenti coinvolti;
- metodi di misurazione a letture ripetute, che prevedono di eseguire più letture di ogni grandezza in condizioni nominalmente uguali, quindi assegnare la misura come risultato di un'analisi statistica dell'insieme dei dati così ottenuti.

Un altro tipo di classificazione dei metodi di misurazione è quello che tiene conto delle modalità operative di assegnazione di una misura ad un parametro, che permette di individuare le seguenti due categorie:

- metodi di misurazione diretti, che permettono di assegnare la misura ad un parametro a partire da una lettura, o da una serie di letture, di uno strumento senza dover conoscere altri parametri del sistema misurato, eccetto il valore di eventuali campioni, le grandezze di influenza e le grandezze espressamente richiamate nella definizione del misurando;
- metodi di misurazione indiretti, in cui la misura di un parametro è assegnata come risultato di un calcolo che coinvolge il valore di altri parametri misurati in modo diretto.

3.2.1 Metodi di misurazione diretti

I metodi di misurazione diretti sono basati sul confronto tra la grandezza in misura ed una grandezza della stessa specie generata da (o memorizzata in) un campione locale.

Le misurazioni dirette più frequenti sono quelle eseguite con il metodo a lettura diretta, ossia assegnando la misura m a partire dall'indicazione l fornita da uno strumento al cui ingresso è applicato il misurando mediante la relazione:

$$m = f_t(l), \quad (1)$$

dove f_t è la funzione di taratura memorizzata nello strumento impiegato.

Questo metodo di misurazione presuppone quindi che lo strumento sia sottoposto a taratura prima dell'uso, allo scopo di determinare la corrispondenza tra le letture fornite dallo strumento e le misure delle grandezze applicate al suo ingresso.

I principali contributi di incertezza delle misure ottenute con questa tecnica sono:

- incertezza strumentale, che è dichiarata dal costruttore e che solitamente dipende dal valore assunto dalle grandezze di influenza significative e dal tempo trascorso dall'ultima operazione di messa a punto;
- incertezza di lettura (significativa soprattutto nel caso di strumenti a indicazione analogica);
- carico strumentale, ossia alterazione del sistema misurato conseguente all'interazione con lo strumento;
- incertezza intrinseca del misurando, che è legata alla sua definizione;
- imperfetta definizione del misurando, dovuta alla conoscenza non perfetta delle grandezze che definiscono lo stato del sistema misurato;
- incertezza con cui sono note le grandezze di influenza.

Un'altra categoria di metodi di misurazione diretti prevede il confronto per opposizione tra la grandezza in misura ed un'altra della stessa specie, che è generata da un campione variabile. In questo caso, nel processo di misurazione è coinvolto un dispositivo ausiliario, la cui funzione è

quella di rilevare la condizione di equivalenza tra il misurando m e la grandezza c_1 fornita dal campione, per cui la misura è assegnata come:

$$m = c_1 .$$

L'incertezza delle misure assegnate in seguito all'applicazione di un metodo di confronto per opposizione dipende dai seguenti contributi:

- incertezza e risoluzione del campione;
- incertezza con cui si realizza la condizione di equivalenza tra misurando e grandezza realizzata dal campione;
- carico strumentale;
- incertezza intrinseca del misurando;
- imperfetta realizzazione della definizione del misurando;
- incertezza di misura delle grandezze di influenza.

Nei circuiti elettrici, tra i metodi di confronto sono spesso impiegati i metodi di zero, nei quali il dispositivo ausiliario è impiegato per rilevare una condizione di equilibrio corrispondente all'annullamento di una corrente o di una tensione del circuito. Quando si raggiunge la condizione di equilibrio, il misurando m può essere espresso in funzione di n grandezze note, fornite da campioni variabili:

$$m = f(c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (2)$$

In questo caso, i contributi di incertezza da considerare sono:

- incertezza e risoluzione dei campioni;
- incertezza con cui si realizza la condizione di zero;
- carico strumentale;
- incertezza intrinseca del misurando;
- imperfetta definizione del misurando;
- incertezza di misura delle grandezze di influenza.

Una variante del metodo di zero è costituita dal metodo di sostituzione, che consta di due fasi distinte, di cui la prima richiede di realizzare la condizione che permette di esprimere il misurando mediante la relazione (2), impiegando dispositivi caratterizzati da elevata stabilità, in quanto, come si vedrà, la loro incertezza non influenza la stima del misurando. In una seconda fase, si sostituisce al sistema in misura un campione variabile che realizzi una grandezza c_R omogenea con il misurando; quindi, si realizza nuovamente la condizione di equilibrio agendo esclusivamente sul campione c_R e lasciando inalterati gli altri dispositivi. In queste condizioni vale la relazione:

$$c_R = f(c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (3)$$

per cui la misura m è assegnata semplicemente come:

$$m = c_R . \quad (4)$$

Si osservi che, in questo caso, l'incertezza della misura m dipende dall'incertezza del campione c_R e dalla stabilità a breve termine dei dispositivi che realizzano i valori c_1, c_2, \dots, c_n , che possono essere noti anche solo approssimativamente.

3.2.2 Metodi di misurazione indiretti

Un metodo di misurazione è considerato indiretto quando la misura del parametro di un sistema è assegnata mediante un calcolo che coinvolge altri parametri del sistema stesso o di altri sistemi con esso interagenti. La stima di questi parametri è ottenuta mediante metodi di misurazione diretti.

L'applicazione di un metodo di misurazione indiretto presuppone, quindi, l'esistenza di un modello matematico, che esprima in modo esplicito il legame tra il misurando e le altre grandezze sottoposte a misurazione diretta. Se si indicano con m_I il misurando ottenuto indirettamente e con m_{D_i} le grandezze misurate per via diretta, questo legame può essere espresso mediante la relazione:

$$m_I = f(m_{D1}, m_{D2}, \dots, m_{D_N}) \quad (5)$$

dove, per semplicità, è stata omessa la dipendenza dalle grandezze che definiscono lo stato del sistema in misura e dalle grandezze di influenza, che deve sempre essere considerata.

Esempi di misurazione indiretta sono la determinazione del volume di un solido di forma sferica a partire dalla misura del suo diametro, oppure la stima della resistenza elettrica di un dispositivo mediante il metodo voltamperometrico.

Nel caso dei metodi di misurazione indiretti, l'incertezza è stimata a partire dalle incertezze delle grandezze ottenute per via diretta applicando le regole descritte nel capitolo successivo. In questo caso, un contributo di incertezza aggiuntivo è costituito dalla cosiddetta incertezza di modello, che tiene conto del fatto che il modello espresso mediante la relazione (5) non descrive in modo adeguato le interazioni tra il misurando e gli altri parametri sottoposti a misurazione diretta.

Se si considera nuovamente il caso della misura del volume di un solido ottenuta a partire dalla misura del suo diametro, l'incertezza di modello potrebbe essere legata, per esempio, al fatto che il solido non ha esattamente forma sferica od alla non perfetta conoscenza della legge di dilatazione termica del solido in esame.

3.3 Diagramma di produzione di una misura

Il processo logico che deve essere seguito da chi si appresta ad effettuare una misurazione è detto diagramma di produzione di una misura e comprende le fasi di progettazione, esecuzione e presentazione dei risultati, come mostrato negli schemi delle figg. 1 e 2.

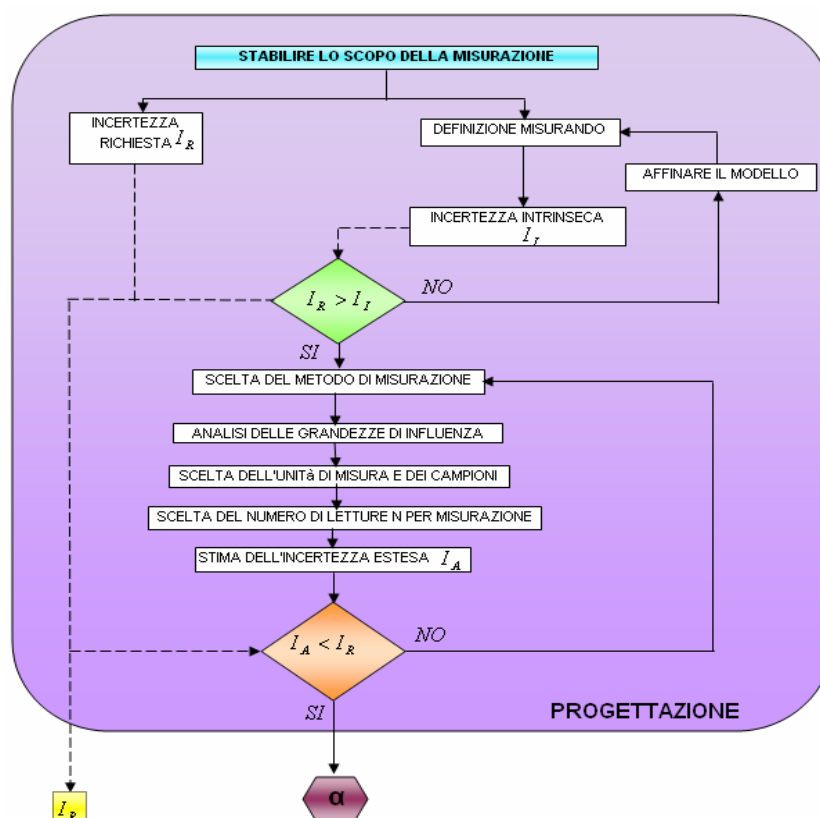


Fig. 3.1 - Diagramma di produzione di una misura per la fase di progettazione.

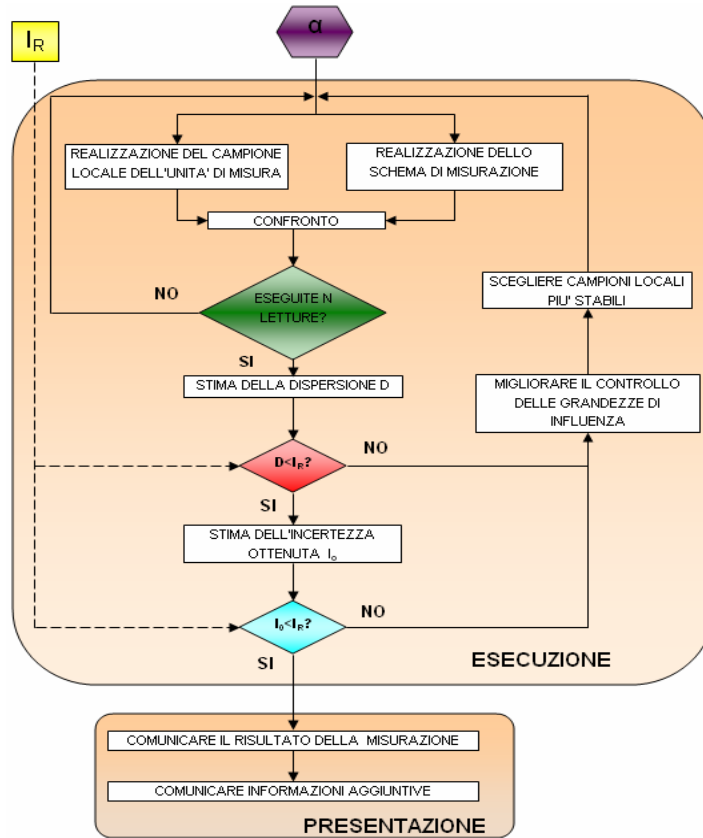


Fig. 3.2 - Diagramma di produzione di una misura per le fasi di esecuzione e di presentazione dei risultati

Il primo passo della fase di progettazione di una misura (fig. 1) consiste nello stabilire lo scopo per cui si esegue la misurazione. Ciò è di fondamentale importanza per poter fissare l'incertezza richiesta I_R , che deve essere adeguata allo scopo. Si fornisce quindi la definizione del misurando, indicando chiaramente le grandezze che individuano lo stato del sistema misurato. Questa definizione fissa un limite inferiore all'incertezza con cui il misurando può essere stimato, che è detta incertezza intrinseca.

Se l'incertezza richiesta è minore dell'incertezza intrinseca, I_I , il misurando non è stato definito in modo adeguato allo scopo della misurazione: l'incertezza intrinseca può essere ridotta solo affinando il modello che definisce il misurando, considerando ad es. un numero maggiore di parametri per definire lo stato del sistema misurato oppure controllando e/o misurando meglio questi parametri.

Quando la definizione del misurando è adeguata all'incertezza richiesta, si procede alla scelta del metodo di misurazione, cioè si specificano le procedure operative, le apparecchiature e le tecniche di elaborazione impiegate per l'esecuzione della misurazione. Si individuano quindi le grandezze di influenza significative, ossia quelle grandezze che alterano le caratteristiche delle apparecchiature impiegate e/o l'interazione tra il sistema misurato e le apparecchiature stesse. Si stabilisce il campo di variazione ammesso, in base all'incertezza richiesta, per le grandezze di influenza e, quando è necessario, si fissa l'incertezza con cui una o più grandezze di influenza devono essere misurate o controllate.

Il passo successivo consiste nella scelta dell'unità di misura da adottare e dei campioni che riproducono uno o più valori della grandezza misurata.

Nel caso in cui si voglia ricorrere ad un metodo di misurazione a letture ripetute, per esempio per ridurre mediante un opportuno modello probabilistico l'influenza del rumore sull'incertezza di misura, si decide il numero N di letture da effettuare per ogni misurazione.

Le scelte fatte consentono a questo punto di eseguire una stima dell'incertezza attesa, I_A , in base alle caratteristiche delle apparecchiature e dei campioni impiegati, al contributo delle grandezze di influenza ed alle tecniche di elaborazione adottate. Se questa incertezza è maggiore dell'incertezza richiesta, è necessario ricorrere ad un altro metodo di misurazione, oppure impiegare campioni che garantiscano prestazioni migliori oppure formulare richieste più stringenti per le grandezze di influenza.

La fase di esecuzione della misurazione (fig. 1) prevede innanzitutto la realizzazione dello schema di misurazione e del campione locale dell'unità di misura adottata. Il confronto tra il misurando e la grandezza riprodotta dal campione locale fornisce la lettura; nel caso di misurazione a letture ripetute, questo confronto sarà ripetuto N volte come stabilito durante la fase di progettazione.

Al termine della misurazione, si effettua la stima della dispersione D delle N letture ottenute: se D è maggiore dell'incertezza richiesta, è necessario ricorrere a campioni locali più stabili e riesaminare l'effetto delle grandezze di influenza, che devono probabilmente essere meglio controllate e/o misurate. Se invece la dispersione D è adeguata all'incertezza richiesta, si procede al calcolo dell'incertezza di misura, I_o , ottenuta: se questa risulta inferiore all'incertezza richiesta, si passa alla fase di presentazione dei risultati, altrimenti si deve migliorare la realizzazione del campione locale dell'unità di misura ed il controllo delle grandezze di influenza.

La presentazione dei risultati di una misurazione deve essere svolta con particolare attenzione, altrimenti si rischia di perdere parte dell'informazione ottenuta, spesso a caro prezzo, durante le fasi precedenti. L'informazione deve essere chiara e completa: è importante eliminare qualunque causa potenziale di ambiguità o di arbitrarietà.

Il risultato della misurazione deve essere comunicato sempre mediante le seguenti tre informazioni:

1. valore del misurando;
2. valore dell'incertezza di misura;
3. unità di misura.

Inoltre, devono essere sempre comunicati:

- la definizione del misurando;
- il valore dei parametri che individuano lo stato del sistema misurato;
- il valore delle grandezze di influenza significative.

Altre informazioni che possono essere comunicate al fruitore della misura sono:

- il metodo di misurazione impiegato;
- l'elenco dei contributi di incertezza;
- la descrizione di eventuali tecniche di elaborazione statistica adottate;
- riferibilità dei campioni primari;
- condizioni ambientali;
- settaggio strumenti;
- documentazione utilizzata.

3.4 La stima dell'incertezza di misura

L'obiettivo di una misurazione è quello di stimare il valore del misurando, cioè il valore della particolare grandezza da misurare. Una corretta misurazione comincia, quindi, con una opportuna definizione del misurando, del metodo di misurazione e del procedimento di misurazione.

In generale, nella taratura, si stabilisce una relazione funzionale tra un misurando, o grandezza di uscita Y , e un certo numero N di grandezze di ingresso X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) del tipo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

La funzione f , che rappresenta, nello stesso tempo, la procedura di misurazione e il metodo di valutazione, può essere determinata, o per via sperimentale, o mediante un algoritmo numerico. Per la nostra trattazione, che sarà riportata nel cap. 4, la funzione f sarà considerata nel senso più ampio possibile, ossia come una funzione contenente ogni grandezza, comprese quelle correzioni e quei fattori di correzione che possono originare una componente di incertezza non trascurabile sul risultato della misurazione.

L'insieme delle grandezze X_i può essere suddiviso in due categorie, in base al modo in cui sono stati determinati il valore e l'incertezza associata:

- a) grandezze i cui valori e le cui incertezze sono determinati direttamente nella misurazione. Possono essere ottenuti da una singola osservazione, da

- più osservazioni ripetute o da esperienze pregresse, e possono comportare correzioni degli strumenti di misura e delle grandezze di influenza, come le condizioni di pressione e la temperatura ambientali;
- b) grandezze i cui valori con le relative incertezze entrano nella misurazione da fonti esterne, come grandezze associate a campioni di misura tarati e materiali di riferimento certificati.

3.4.1 Valutazione dell'incertezza tipo delle stime d'ingresso secondo la Guida all'Incertezza di Misura (GUM)

Le incertezze delle stime di ingresso sono ottenute con metodi classificabili in due categorie, A e B. Il metodo di valutazione di categoria A dell'incertezza tipo si basa sull'analisi statistica di una serie di osservazioni ripetute. In questo caso l'incertezza tipo è rappresentata dallo scarto tipo sperimentale della media delle osservazioni ottenuta con la media aritmetica o con una analisi di regressione. La valutazione delle incertezze di tipo B non è basata su analisi statistiche relative ad osservazioni, ma su un altro insieme di informazioni tra cui:

- Dati di misure precedentemente raccolti;
- Esperienza o conoscenza del comportamento e delle proprietà dei materiali e strumenti di interesse;
- Specifiche tecniche del costruttore;
- Dati di certificati di taratura o di altra documentazione;
- Incertezze assegnate a valori di riferimento presi dai manuali;
- Influenza dei parametri in sede di taratura.

3.4.2 Incertezza tipo di categoria A

La valutazione di categoria A dell'incertezza tipo può essere applicata quando siano state fatte diverse osservazioni indipendenti, per le quali la distribuzione di probabilità è determinata con un criterio “*statistico*”. Se il processo di misurazione ha sufficiente risoluzione, si osserverà una dispersione dei valori ottenuti. Per esse, la migliore stima del valore q è data dalla media delle N osservazioni indipendenti q_j effettuate e prende il nome di “*valore atteso sperimentale*” o “*media aritmetica*” \bar{q} dei valori delle singole osservazioni q_j ($j = 1, 2, \dots, N$).

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n q_j \quad . \quad (7)$$

Il parametro che esprime l'incertezza tipo da associare al valore stimato del misurando è la media dello “*scarto tipo sperimentale al quadrato*”, che si può valutare in uno dei seguenti modi:

- Una prima stima della varianza della distribuzione di probabilità della popolazione è la *varianza sperimentale*, $s^2(q)$, dei valori q_j definita come:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (8)$$

La sua radice quadrata è definita *scarto tipo sperimentale*. La migliore stima della varianza della media aritmetica \bar{q} è la *varianza sperimentale della media* data da:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (9)$$

La sua radice quadrata è lo *scarto tipo sperimentale della media*.

L'incertezza tipo $u(\bar{q})$ associata alla grandezza di ingresso \bar{q} è lo *scarto tipo sperimentale della media*:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (10)$$

- Nel caso di misurazione sotto controllo statistico, può essere disponibile una stima cumulata della varianza, s_p^2 , che caratterizza la dispersione meglio di una stima dello scarto tipo ottenuta da un limitato numero di osservazioni. Nei casi in cui il valore della grandezza di ingresso è determinato mediante la media aritmetica \bar{q} di un piccolo numero n di osservazioni indipendenti, la varianza della media può essere stimata con:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{N} \quad (11)$$

3.4.3 Incertezza tipo di categoria B

La valutazione dell'incertezza di tipo B è quella valutazione della stima, x_i , di una grandezza di ingresso, X_i , che non è stata ottenuta da osservazioni ripetute e pertanto viene anche chiamata "*valutazione di tipo probabilistico*". L'incertezza tipo, $u(x_i)$, viene fuori dalla raccolta di tutte le informazioni utili sul range di variabilità di X_i .

L'utilizzo appropriato delle informazioni a disposizione necessita di intuizione basata sull'esperienza e sulla conoscenza globale del problema. Una corretta valutazione di categoria B può essere molto attendibile (al pari di una di tipo A) nel caso particolare di valutazione di tipo A basata su un piccolo numero di osservazioni indipendenti secondo i tre casi riportati in seguito:

- ✓ Quando è noto un solo valore della grandezza X_i , cioè un'unica misura, il risultato di una misura precedente, un valore di riferimento tratto dalla letteratura o il valore di una correzione che sarà usato come x_i . Quando è

nota l'incertezza tipo $u(x_i)$ sarà associata a x_i . Altrimenti essa sarà calcolata da altri dati di incertezza o valutata in base alle esperienze fatte.

- ✓ Quando, in base alla teoria o all'esperienza, si può assumere per X_i una distribuzione di probabilità la stima x_i e l'incertezza $u(x_i)$ sono, rispettivamente, il valore atteso della distribuzione e la radice quadrata della sua varianza.
- ✓ Se per il valore di una grandezza X_i si possono stimare solo gli estremi inferiore e superiore di un intervallo a_+ e a_- si assumerà una pdf (funzione densità di probabilità) costante in tale intervallo (distribuzione rettangolare uniforme) per la possibile variabilità della grandezza X_i . Ciò implica che:

$$x_i = \frac{1}{2} (a_+ + a_-) \quad (12)$$

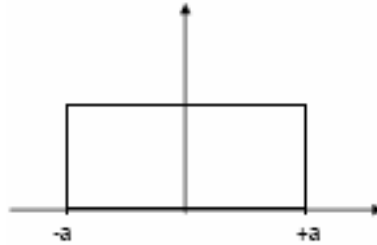


Fig. 3.3 - Distribuzione rettangolare uniforme

per la stima, e

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12} (a_+ - a_-)^2 \quad (13)$$

per il quadrato dell'incertezza tipo. Se la differenza tra gli estremi è $2a$, la precedente diventa:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3} a^2. \quad (14)$$

3.4.4 Calcolo dell'incertezza tipo della stima d'uscita

Per le grandezze di ingresso non correlate il quadrato dell'incertezza tipo della stima di uscita y (o incertezza tipo composta) è dato da:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (15)$$

Il termine $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) è il contributo all'incertezza tipo composta risultante

dall'incertezza tipo della stima d'ingresso x_i

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (16)$$

dove c_i è il coefficiente di sensibilità della stima di ingresso x_i , cioè la derivata parziale della funzione f rispetto a X_i , vista per il valore x_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (17)$$

Il coefficiente di sensibilità c_i rende conto di quanto la stima d'uscita y è influenzata dalle variazioni della stima di ingresso x_i . Esso può essere calcolato con l'equazione sopra o usando metodi numerici, cioè calcolando la variazione della stima di uscita y dovuta ad una variazione della stima di ingresso x_i di $+u(x_i)$ e $-u(x_i)$ e prendendo come valore di c_i la risultante variazione di y divisa per $2u(x_i)$.

Se due grandezze d'ingresso sono in qualche modo correlate, cioè se sono mutuamente dipendenti, occorre considerare la loro covarianza tra i contributi all'incertezza. La capacità di tener conto dell'effetto delle correlazioni dipende dalla conoscenza del processo di misura e dalla valutazione della mutua dipendenza delle grandezze di ingresso. In generale si deve considerare che trascurando la correlazione tra le grandezze di ingresso si può incorrere in una valutazione sbagliata dell'incertezza tipo del misurando.

La covarianza associata alla stima di due grandezze d'ingresso X_i e X_k può essere considerata trascurabile se:

- Le grandezze d'ingresso X_i e X_k indipendenti, per esempio, perché sono state osservate in differenti esperimenti ripetutamente ma non simultaneamente o perché esse rappresentano grandezze risultanti da valutazioni fatte in modo indipendente.
- Una delle grandezze d'ingresso X_i e X_k può essere considerata costante.
- L'indagine non fornisce indicazioni sulla presenza di correlazione tra le grandezze d'ingresso X_i e X_k .

Talvolta le correlazioni possono essere eliminate con una appropriata scelta della relazione funzionale.

3.4.5 Incertezza tipo composta

Nel corso di un processo o di una prova, le grandezze in gioco con incertezze, sia di categoria A che di categoria B, possono essere numerose. La questione da affrontare è come calcolare l'incertezza tipo composta, $u(y)$,

pertinente al risultato, y , del processo o prova.

La formula che traduce algebricamente questa legge, quando tutte le grandezze x_i sono fra loro non correlate e indipendenti, è:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(\bar{x}_i) \right]} \quad (18)$$

dove sotto radice è la sommatoria dei quadrati delle derivate parziali della funzione y rispetto alle singole variabili x_i moltiplicate per il quadrato delle incertezze tipo $u(\bar{x}_i)$ di cui sono affette le diverse grandezze di ingresso x_i .

La $u(y)$, precedentemente definita, viene chiamata *incertezza tipo composta del misurando*.

L'utilizzo di tale espressione è corretto solo se tutte le grandezze in gioco per ricavare il risultato y del processo o prova sono fra loro non correlate e indipendenti. Quando le grandezze di ingresso sono correlate, l'espressione adatta per la varianza composta $u_c^2(y)$ associata al risultato di una misurazione è:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j), \quad (19)$$

dove x_i e x_j sono le stime X_i e X_j ed $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ è la covarianza stimata associata a x_i e x_j . Il grado di correlazione tra x_i e x_j è *caratterizzato dal coefficiente di correlazione* stimato:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}, \quad (20)$$

in cui $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$, e $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$. E' chiaro che, se le stime x_i e x_j sono indipendenti, allora $r(x_i, x_j) = 0$. e una variazione in una delle due non comporta che ci si aspetti una variazione nell'altra.

L'incertezza totale delle misure dirette, che tiene conto di tutti i contributi delle varie incertezze che entrano nella stima del misurando, viene scritta come segue:

$$u(x) = \sqrt{u_A^2 + u_{B,S}^2 + u_{B,CAL}^2 + u_{B,BT}^2 + u_{B,MT}^2 + u_{B,LT}^2 + u_{B,E}^2}, \quad (21)$$

in cui:

- u_A^2 è il contributo delle incertezze di tipo A;
- $u_{B,S}^2$ è il contributo dell'incertezza di tipo B dovuta alla strumentazione;

- $u_{B,CAL}^2$ è il valore fornito dalla taratura in corrispondenza del confronto fra il valore vero del campione che ha tarato lo strumento e il valore misurato con lo strumento stesso;
- $u_{B,LT}^2$ è il valore numerico legato alla stabilità dello strumento a lungo termine;
- $u_{B,MT}^2$ è il valore numerico legato alla stabilità dello strumento a medio termine;
- $u_{B,BT}^2$ è il valore numerico legato alla stabilità dello strumento a breve termine;
- $u_{B,E}^2$ è il valore legato alla capacità dello strumento a fornire misure all'interno dell'accuratezza dichiarata in determinate condizioni esterne specificate in termini di temperatura, umidità, pressione atmosferica, campi elettromagnetici, vibrazioni, etc.

3.4.6 Determinazione dell'incertezza estesa

Anche se spesso l'incertezza tipo composta $u(y)$ è sufficiente a caratterizzare una misurazione, in molte applicazioni di vario genere, si preferisce definire un intervallo più ampio $U(y)$, intorno al risultato y , in maniera tale che vi possano essere compresi una maggiore quantità di valori che possono essere attribuiti al misurando in questione.

Tale intervallo viene denominato incertezza estesa e si ricava moltiplicando l'incertezza tipo composta per un opportuno fattore di copertura, ossia:

$$U(y) = k u(y) . \quad (22)$$

Il risultato di una misurazione viene, quindi, espresso in modo appropriato come $Y = y \pm U$, nel senso che la migliore stima del valore attribuibile al misurando Y è y e che ci si aspetta che l'intervallo da $y-U$ a $y+U$ comprenda una gran parte della distribuzione di valori ragionevolmente attribuibili a Y , cioè avente un livello di fiducia p elevato e specificato.

Il valore di questo fattore k , che genera un intervallo corrispondente ad un livello di fiducia specifico, viene fuori da una conoscenza dettagliata della distribuzione di probabilità caratterizzata dal risultato della misurazione e dalla sua incertezza tipo composta.

Per esempio, se una certa grandezza z ha distribuzione Normale con media μ_z e deviazione standard σ , il valore di k , che genera un intervallo $\mu_z \pm k \sigma$ comprendente la porzione p della distribuzione e, quindi, avente probabilità di copertura o livello di fiducia p , può essere calcolato secondo la tab. 3.1.

Tab. 3.1 - Valore del fattore di copertura k che genera un intervallo avente livello di fiducia p nel caso di distribuzione Normale

Livello di fiducia p (per cento)	Fattore di copertura k
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

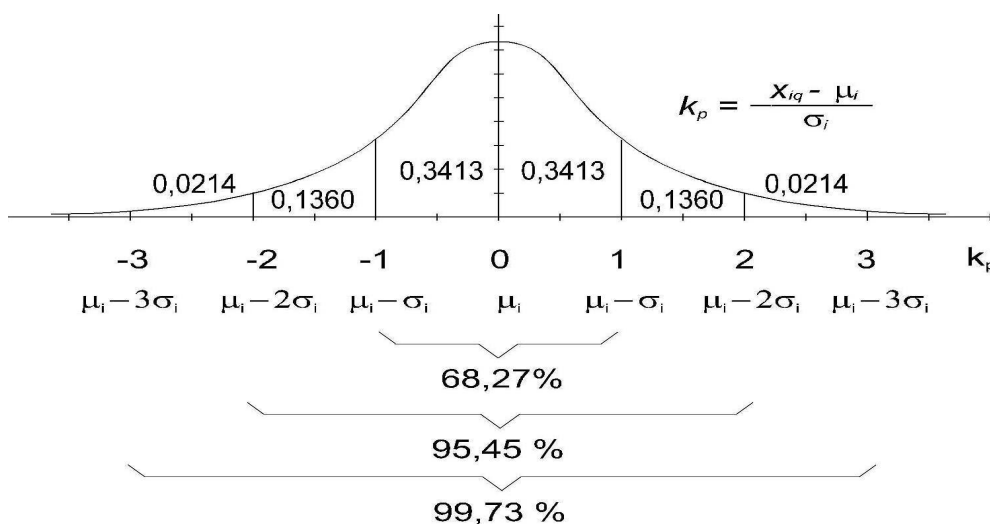
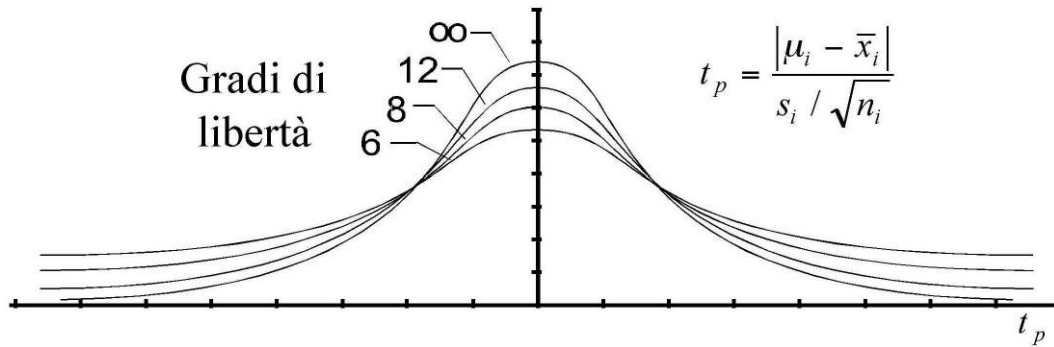


Fig. 3.4 - Rappresentazione grafica di k_p

In una grande quantità di casi pratici, comunque, la distribuzione che più spesso si incontra è la **t di Student** a $\nu = n-1$ gradi di libertà, descritta dall'equazione:

$$t_p = \frac{(\bar{x}_i - \mu_i)}{(s_i / \sqrt{n_i})}, \quad (23)$$

dove \bar{x}_i è il valore medio delle misurazioni ed è una stima del valore atteso μ_i , mentre s_i è lo scarto tipo sperimentale della serie di misurazioni ed è una stima di σ_i .

Fig. 3.5 - La distribuzione di $p(t_p)$ in funzione di t_p

In pratica, si cerca quel valore di t , chiamato $t_p(\nu)$, per un valore specificato del parametro ν -i gradi di libertà, tale che la porzione p della distribuzione t è compresa entro l'intervallo da $-t_p(\nu)$ e $+t_p(\nu)$. Pertanto l'incertezza estesa, che ora porta il pedice p per ricordare la corrispondenza ad un preciso livello di fiducia dell'intervallo, diventa ora:

$$U_p = k u(y) = t_p(\nu) u(y) \quad (24)$$

In generale, la distribuzione t non descrive la distribuzione della variabile $\frac{(y - Y)}{u(y)}$ se la $u^2(y)$ è somma di due o più componenti di varianza stimate

$u_i^2(y) = c_i^2 u^2(x_i)$, dove $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$, anche se ciascuna delle x_i è la stima di una

grandezza di ingresso X_i distribuita normalmente. Tuttavia, si può supporre che la distribuzione di probabilità risultante sia comunque una t di Student utilizzando un particolare valore $k_p = t_p(\nu_{eff})$, in cui abbiamo sostituito ai gradi di libertà di $u_c(y)$, precedentemente definiti, quelli effettivi ricavati dalla formula di Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (25)$$

con $\nu_{eff} \leq \sum_{i=1}^N \nu_i$.

Per ricavare ν_{eff} dall'eq.(25), occorre conoscere i gradi di libertà ν_i di ogni componente di incertezza tipo. Per una componente ottenuta da una valutazione di categoria A, si ricava ν_i dal numero di osservazioni ripetute e indipendenti, su cui è basata la corrispondente stima di ingresso, e dal numero di grandezze indipendenti determinate da quelle osservazioni. Per una componente

ottenuta da una valutazione di categoria B, si ricava ν_i quantificando l'affidabilità del valore di quella componente.

Tab. 3.2 - Valore di $(t_p(\nu))$ della distribuzione t con ν gradi di libertà che definisce un intervallo tra $-t_p(\nu)$ e $+t_p(\nu)$ comprendente la frazione p della distribuzione

Gradi di libertà (ν)	Frazione p in percento					
	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
∞	1,00	1,64	1,96	2,00	2,58	3,00

Osservando la tab. 3.2, si può notare che, considerando $p = 95\%$, nell'intervallo dei valori di $\nu = (\nu_{eff})$ tra 10 e l'infinito, t_p assume valori compresi tra 2,23 e 1,96 (uguale a k_p per $p = 95\%$ nella tabella 1). Allora tenendo conto delle opportune approssimazioni, si ritiene che quando ν_{eff} è almeno parlo o superiore a 10, si possa sostituire il valore esatto di t_p con un fattore di copertura $k = 2$. Con lo stesso ragionamento nello stesso campo di valori di ν_{eff} si può sostituire t_p con un fattore di copertura $k = 3$ se si considera $p = 99\%$. Infatti, in questo caso: $3,17 > t_p > 2,58$.

3.5 Il Supplemento 1 alla GUM

Il Supplemento 1 alla GUM rappresenta un tentativo di colmare le lacune presenti nella GUM. Esso è stato redatto nel 2004 e non è ancora un documento ufficiale ma solo una proposta in fase di revisione.

Tale supplemento esprime il concetto della propagazione delle

distribuzioni attraverso un modello di misura come base per la valutazione dell'incertezza nelle misure e l'implementazione di ciò tramite il metodo Monte Carlo. La procedura viene applicata ad un modello avente un certo numero di quantità di input e una singola (scalare) quantità di output (a volte meglio nota come “misurando”). In particolare, l'utilizzo della *pdf* per la quantità di output permette la determinazione di un intervallo di copertura per quel determinato valore che corrisponde ad un prefissato intervallo di copertura. La tecnica della simulazione Monte Carlo, in generale, fornisce una soluzione semplice per modelli complicati o per modelli le cui quantità di input hanno incertezze “larghe” o *pdf* asimmetriche.

La procedura di valutazione basata sulle distribuzioni di probabilità è interamente consistente con la GUM nel senso che essa ricade nella categoria degli “altri metodi analitici o numerici” [GUM sottoclausola G.1.5] presenti nella Guida. Inoltre la legge di propagazione delle distribuzioni è una generalizzazione dell'approccio predominante nella GUM in cui si lavora con maggiore ricchezza di informazioni rispetto a quelle fornite dalle sole migliori stime e le incertezze standard ad esse associate.

Il supplemento, inoltre, fornisce una procedura per la validazione, in ogni singolo caso, dell'uso della legge di propagazione delle incertezze.

3.6 La Trasformata Unscented

Tale approccio è stato proposto per superare le limitazioni presenti nella GUM per quanto riguarda la stima sia del valore atteso in uscita che della deviazione standard, che rappresenta proprio l'incertezza standard associata al misurando Y . Il principio che sta alla base di tale approccio è quello che “è più semplice approssimare una distribuzione di probabilità che approssimare una funzione o una trasformazione arbitrariamente non lineare”. A tale scopo viene scelto un set di punti (denominati “*sigma points*”) nel dominio di input N dimensionale della funzione f . In questo modo i loro momenti sono uguali a quelli che caratterizzano le variabili random in input. La funzione f viene di volta in volta applicata ad ogni singolo sigma point per ottenere un insieme di punti trasformati. Le caratteristiche statistiche di tali punti trasformati possono essere quindi calcolate al fine di creare una stima del valore atteso di output e della deviazione standard.

3.7 Regole di scrittura

1	I simboli dell'incertezza sono normalmente i seguenti: u per l'incertezza tipo, u_c per l'incertezza composta, U per l'incertezza estesa.
2	I valori di incertezza, rappresentando una fascia di valori di distribuzione di probabilità intorno al misurando, devono essere espressi senza segno, ovvero: $u_c(y) = 0.1$ bar e non $u_c(y) = \pm 0.1$ bar, $U(y) = 0.2$ bar e non $U(y) = \pm 0.2$ bar.
3	Il risultato di una misurazione deve essere sempre presentato sotto forma di valore misurato con la sua incertezza di misura estesa, ovvero $Y = y \pm U(y)$ e il fattore di copertura k , utilizzato nella stima dell'incertezza estesa, dovrebbe essere specificato, e meglio se è specificato anche il suo livello di probabilità.
4	Se la frazione della distribuzione di probabilità è definita ed ha valore p , si dovrebbe scrivere $U_p(y) = k_p \cdot u_c(y)$. Per esempio, se $p = 0,95$ (al normale livello di fiducia o di confidenza del 95%, ovvero a livello di 2 scarti tipo σ), si dovrebbe scrivere esplicitamente: $U_{95}(y) = k_{95} \cdot u_c(y) = 2 \cdot u_c(y)$.
5	Il numero di cifre significative per rappresentare l'incertezza è di 1 cifra arrotondata per eccesso, mentre per la incertezza relativa $u_r(y) = u(y)/y$ il numero di cifre significative è 2 arrotondate per eccesso Es. se $U(y) = 0,167$ si scriverà $U(y) = 0,2$, se $u_r(y) = 1,234\%$, si scriverà $1,3\%$.
6	Non è ammesso l'uso di prefissi composti, per cui è corretto scrivere 5pF, ma NON si può scrivere 5mnF.
7	Quando si fornisce il risultato di una misurazione, devono essere riportate soltanto le cifre significative, per cui è opportuno ricorrere ai multipli e sottomultipli delle unità SI per evitare ambiguità. Ad esempio:

VALORE	7500N	13540V	0,000115m ³
CIFRE SIGNIFICATIVE	2	4	3
SCRITTURA	7,5kN	13,54kV	115cm ³

8	I nomi delle unità SI, dei multipli e dei sottomultipli sono nomi comuni, per cui devono essere scritti con l'iniziale minuscola. Si scriverà quindi ampere e NON Ampere, kelvin e NON Kelvin, gigahertz e NON Gigahertz o GigaHertz. Anche i simboli delle unità di misura sono scritti con l'iniziale minuscola, tranne quelli derivanti da nomi propri (ad esempio s per secondo, m per metro, C per coulomb, J per joule). È corretto scrivere decine di metri, centinaia di volt (e NON volts), alcuni radianti, pochi kelvin (e NON kelvins). I multipli e sottomultipli debbono rispettare la seguente tabella.
---	--

exa	peta	tera	giga	mega	kilo	etto	deca	deci	centi	milli	micro	nano	pico	femto	atto
E	P	T	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p	f	a
10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}

CAPITOLO 4

METODO DI INTEGRAZIONE DIRETTA PER IL CALCOLO DELL'INCERTEZZA E APPLICAZIONI

4.1 Generalità

Tutti i processi di misura danno risultati soggetti ad incertezza. La valutazione dell'incertezza viene attualmente effettuata seguendo le metodologie proposte nella "Guide to the expression of Uncertainty in Measurement" (GUM)[1]. Questi metodi sono rigorosamente esatti solo in presenza di pdf (*probability density function*) dei valori in ingresso simmetriche e modelli matematici dei processi di misura lineari o, in generale, rappresentabili esattamente tramite uno sviluppo in serie di Taylor con un numero finito di termini.

Parte di queste limitazioni è stata superata nel Supplemento 1 [2] alla Guida, che suggerisce l'adozione del metodo Monte Carlo per il calcolo della pdf del misurando Y a partire dalle pdf delle grandezze di ingresso e dal modello matematico relativo al processo di misura, indipendentemente dalla validità delle ipotesi di applicabilità della GUM.

La relativa lentezza di calcolo del metodo Monte Carlo ha condotto recentemente allo sviluppo del metodo della "*Trasformata Unscented*" (UT) [47], seguito da un nuovo metodo, particolarmente veloce e di notevole precisione, proposto in questa tesi e, sembra, in grado di affiancarsi con efficacia a quelli finora sviluppati.

4.2 I metodi attualmente utilizzati

✓ Metodi GUM

Nella GUM [1] sono descritte due metodologie di valutazione dell'incertezza: tipo A e tipo B.

Per effettuare il calcolo dell'incertezza di tipo A si effettuano misure ripetute, giungendo ad una popolazione di risultati la cui deviazione standard è utilizzata come stima dell'incertezza.

Per effettuare il calcolo dell'incertezza di tipo B occorre partire dalle funzioni di densità di probabilità dei valori in ingresso e da un modello matematico $Y = f(X)$ che, a partire dal vettore delle grandezze in ingresso $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, fornisca il risultato Y . Questa incertezza, detta "composta"

e denominata $u_c(y)$, viene ottenuta tramite l'opportuna composizione delle incertezze tipo delle stime delle variabili di ingresso $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$. Qualora il modello matematico sia, almeno approssimativamente, lineare vale l'espressione:

$$u^2_c(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (57)$$

La relazione (57) prende il nome “*legge di propagazione delle incertezze*” (LPU).

Tale modello è basato sull'utilizzo dello sviluppo in serie di Taylor della funzione di trasferimento f troncato al primo ordine. È possibile anche prendere in considerazione altri termini dello sviluppo in serie nei casi in cui la non linearità di f sia significativa. Va tuttavia tenuto presente che, in ogni caso, le funzioni trascendenti non possono essere correttamente rappresentate da uno sviluppo in serie di Taylor a causa del un numero finito di termini che con esso possono essere presi in considerazione.

✓ **Supplemento 1 alla GUM**

Per superare le limitazioni insite nei metodi descritti nella GUM, è stato proposto (anche se non adottato ancora a livello ufficiale) un metodo basato sulla simulazione Monte Carlo [2]. Tale supplemento esprime il concetto della propagazione delle distribuzioni attraverso un modello di misura come base per la valutazione dell'incertezza nelle misure e l'implementazione di ciò tramite il metodo Monte Carlo.

La procedura viene applicata ad un modello avente un certo numero di quantità di input e una singola (scalare) quantità di output (a volte meglio nota come “misurando”). In particolare, l'utilizzo della *pdf* per la quantità di output permette la determinazione di un intervallo di copertura per quel determinato valore che corrisponde ad un prefissato intervallo di copertura. La tecnica della simulazione Monte Carlo, in generale, fornisce una soluzione semplice per modelli complicati o per modelli le cui quantità di input hanno incertezze “larghe” o *pdf* asimmetriche.

La procedura basata sulle distribuzioni di probabilità è interamente consistente con la GUM, nel senso che essa ricade nella categoria degli “altri metodi analitici o numerici” [GUM, sottoclausola G.1.5] presenti nella Guida. Inoltre, la legge di propagazione delle distribuzioni è una generalizzazione dell'approccio predominante nella GUM in cui si lavora con maggiore ricchezza di informazioni rispetto a quelle fornite dalle sole migliori stime e le incertezze standard ad esse associate.

Il supplemento, inoltre, fornisce una procedura per la validazione, in ogni

singolo caso, dell'uso della legge di propagazione delle incertezze.

✓ **Trasformata Unscented**

Tale approccio è stato proposto per superare le limitazioni presenti nella GUM per quanto riguarda la stima sia del valore atteso in uscita che della deviazione standard, che rappresenta proprio l'incertezza standard associata al misurando Y . Il principio che sta alla base di tale approccio è quello che “è più semplice approssimare una distribuzione di probabilità che approssimare una funzione o una trasformazione arbitrariamente non lineare”. A tale scopo viene scelto un set di punti (denominati “*sigma points*”) nel dominio di input N dimensionale della funzione f . In questo modo i loro momenti sono uguali a quelli che caratterizzano le variabili random in input. La funzione f viene di volta in volta applicata ad ogni singolo sigma point per ottenere un insieme di punti trasformati. Le caratteristiche statistiche di tali punti trasformati possono essere quindi calcolate al fine di creare una stima del valore atteso di output e della deviazione standard [47].

4.3 Metodo di Integrazione Diretta

Questo metodo è stato recentemente sviluppato dalla candidata e dai suoi collaboratori allo scopo di consentire il calcolo dell'incertezza a prescindere dal rispetto delle ipotesi necessarie all'utilizzo dei metodi GUM, con una rapidità e una precisione superiori a quelle consentite dal metodo Monte Carlo.

Si consideri il set di N variabili aleatorie $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, ognuna avente una data pdf, che viene indicata con $pdf_{X_i}(x_i)$ $i = 1 \dots N$ e caratterizzata da un certo valore atteso e una certa deviazione standard (incertezza). Si consideri, inoltre, il processo di misura descritto da $Y = f(X)$, tale cioè da fornire una misura Y in presenza del vettore X .

Il metodo consiste nel valutare l'incertezza tipo del misurando a partire dalla definizione matematica di varianza.

Per una generica variabile aleatoria Z , avente funzione di distribuzione di probabilità $pdf_Z(z)$, vale [48]:

$$\text{var}(Z) = E[(Z - E(Z))^2] = E[Z^2] - E^2[Z], \quad (58)$$

dove, per definizione, si ha:

$$E[Z^G] = \int_{-\infty}^{+\infty} z^G \cdot pdf_Z(z) \cdot dz , \quad (59)$$

che rappresenta il momento di ordine G della variabile aleatoria Z.

Nella (59), quindi, la varianza è calcolata come differenza tra il momento del secondo ordine e il quadrato del momento del primo ordine.

Applicando questi risultati al processo di misura $Y = f(X)$, si ha che:

$$\text{var}(Y) = E[f^2(X)] - E^2[f(X)] , \quad (60)$$

da cui è possibile ricavare l'incertezza tipo $u_c(Y)$:

$$u_c(Y) = \sqrt{\text{var}(Y)} . \quad (61)$$

L'incertezza calcolata risulta esatta se gli integrali dei momenti possono essere calcolati in forma chiusa. In alternativa è possibile valutarli numericamente.

Si noti che nel calcolo dei momenti è necessaria la conoscenza della pdf. Nel caso in esame la pdf che si deve considerare è la congiunta delle variabili aleatorie X_i . Quando queste ultime risultano incorrelate, la pdf congiunta è pari al prodotto delle pdf delle variabili aleatorie; quando c'è correlazione è necessario conoscere o ricavare la matrice di correlazione delle X_i (analiticamente, quando possibile, oppure numericamente). Un sottoprodotto del procedimento è il valore atteso della grandezza Y.

In seguito saranno proposti alcuni esempi di calcolo dell'incertezza effettuati sia con i metodi di corrente utilizzo che col nuovo metodo.

4.4 Metodi numerici utilizzati per il calcolo degli integrali

Nel corso del presente lavoro ci si è trovati a dover integrare sia su domini finiti che su domini non finiti. Nel caso dei domini non finiti, occorrendo risolvere gli integrali in forma numerica, si è utilizzato come dominio l'intervallo $[\mu - 10\sigma, \mu + 10\sigma]$, dove μ e σ sono media e deviazione standard della pdf (parte della funzione integranda).

L'integrazione numerica è stata effettuata utilizzando due algoritmi [46]:

- algoritmo 1: il metodo dei trapezi in una e due dimensioni;
- algoritmo 2: il metodo di Gauss, che è una generalizzazione del metodo dei trapezi basato sull'interpolazione della funzione integranda in punti strategici, detti punti di Gauss.

Gli esempi dei prossimi sottoparagrafi trattano cinque casi in cui le variabili di ingresso risultano incorrelate ed un caso in cui esiste correlazione. Nei primi cinque casi, sono state sfruttate le seguenti relazioni, valide per due variabili aleatorie X e Y incorrelate:

$$E[XY] = E[X] \cdot E[Y] \quad (62)$$

$$\text{var}[X + Y] = \text{var}[X] + \text{var}[Y] \quad (63)$$

$$\text{var}[XY] = \text{var}[X] \cdot E^2[Y] + \text{var}[Y] \cdot E^2[X] + \text{var}[X] \cdot \text{var}[Y]. \quad (64)$$

4.4.1 Casi di confronto

Caso 1

Si ha il processo di misura descritto dalla seguente equazione:

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \quad (65)$$

in cui le X_i hanno pdf Gaussiane con media nulla e deviazione standard pari ad 1, e sono supposte incorrelate.

Nella tab. 4.1 sono riportati i risultati ottenuti, sia applicando la legge di propagazione dell'incertezza (LPU), che in questo caso fornisce risultati esatti in quanto la (65) è una relazione lineare, sia quelli ottenuti con tre diverse simulazioni Monte Carlo (MC) [1]:

Tab. 4.1 - Valori di incertezza tipo e valore atteso con i metodi LPU e MonteCarlo

Metodo	Valore atteso di Y	Incetezza tipo
LPU	0,00	2,00
MC1	0,01	2,00
MC2	0,00	2,00
MC3	0,00	2,00

Il metodo di Integrazione Diretta è stato usato per la valutazione dell'incertezza tipo di Y , utilizzando il metodo dei trapezi per il calcolo numerico

degli integrali. Poiché le grandezze di ingresso sono incorrelate, si ha il seguente risultato:

$$E[Y] = E[X_1] + E[X_2] + E[X_3] + E[X_4] \quad (66)$$

$$\text{var}[Y] = \text{var}[X_1] + \text{var}[X_2] + \text{var}[X_3] + \text{var}[X_4]. \quad (67)$$

Nella tab. 4.2 sono riportati i risultati ottenuti:

Tab. 4.2 - Valori di incertezza tipo e valore atteso con il metodo di integrazione diretta

	Valore atteso di Y	Incertezza tipo
Integrazione Diretta	0,00	2,00

Caso 2

Si consideri il processo di misura descritto dalla relazione:

$$Y = 1 - X_1^2 - X_2^2, \quad (68)$$

dove le grandezze di ingresso, supposte incorrelate, hanno pdf Gaussiane in cui la X_2 ha valore atteso nullo e deviazione standard (incertezza) pari a 0.005, mentre la X_1 ha deviazione standard (incertezza) pari a 0.005 con valore atteso una volta 0, una volta 0.01, una volta 0.05.

Sono stati confrontati i metodi LPU al secondo ordine dello sviluppo in serie di Taylor e la MC. I risultati ottenuti con questi due metodi sono di seguito riportati:

Tab. 4.3 - Valore atteso di X_1 confrontato con i metodi LPU e MonteCarlo

Valore atteso di X_1	Incertezza di LPU $u/10^{-7}$	Incertezza di MC $u/10^{-7}$
0,00	500	502
0,01	1118	1121
0,05	5025	5012

Il metodo di Integrazione Diretta applicato alla (68), utilizzando le (62),(63),(64), fornisce risultati più precisi della MC ed uguali a quelli della LPU (dato che con lo sviluppo in serie di Taylor al secondo ordine la LPU fornisce il risultato esatto). In tal caso è stato usato il metodo di integrazione di Gauss:

Tab. 4.4 - Valore atteso di X_1 calcolato con il metodo di integrazione diretta

Valore atteso di X_1	Incertezza calcolata con Integrazione Diretta $u/10^{-7}$
0,00	500

0,01	1118
0,05	5025

Nelle tabb. 4.3 e 4.4 si indicano con $u/10^{-7}$ i valori normalizzati rispetto a 10^{-7} .

Caso 3

Si consideri la calibrazione di un peso W di densità di massa ρ_W rispetto ad un peso di riferimento R di densità di massa ρ_R avente la stessa massa nominale e utilizzando una bilancia che opera in aria avente densità di massa a [2]. Avendo normalizzato i valori di densità dei pesi e dell'aria si ottiene una relazione del tipo:

$$m_{W,c} = (m_{R,c} + \delta m_{R,c}) \left(1 + (a - a_0) \left(\frac{1}{\rho_W} - \frac{1}{\rho_R} \right) \right) \quad (69)$$

in cui $m_{W,c}$ e $m_{R,c}$ sono i valori di massa convenzionali, $\delta m_{R,c}$ è il valore convenzionale di un piccolo peso che viene aggiunto a R per bilanciare W , $a_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ è il valore convenzionale della densità dell'aria. La (69) può essere vista come:

$$m_{W,c} = f(m_{R,c}, \delta m_{R,c}, a, \rho_W, \rho_R) \quad (70)$$

Alle variabili di ingresso si assegnano le seguenti pdf:

Tab. 4.5 - Assegnazione delle pdf alle variabili di ingresso

X_i	pdf	valore atteso	deviazione standard
$m_{R,c}$	Gaussiana	100 mg	0.050 mg
$\delta m_{R,c}$	Gaussiana	1,234 mg	0.020 mg
a	Rettangolare	1,20 kg/m ³	0.10/sqrt(3) kg/m ³
ρ_W	Rettangolare	8000 kg/m ³	1000/sqrt(3) kg/m ³
ρ_R	Rettangolare	8000 kg/m ³	50/sqrt(3) kg/m ³

Sono stati confrontati i metodi LPU al primo ordine ed il metodo di Integrazione Diretta, ottenendo risultati in ottimo accordo, come mostra la seguente tabella riassuntiva:

Tab. 4.6 - Confronto tra LPUe metodo di Integrazione Diretta

Metodo	Valore atteso (mg) rispetto al valore nominale 100 mg	Incertezza (mg)
LPU1	1,234	0,0539
Integrazione Diretta	1,234	0,0539

Caso 4

Si consideri il seguente processo di misura, che rappresenta la valutazione della lunghezza di un blocchetto piano parallelo di materiale avente coefficiente di dilatazione lineare α ad una data temperatura T :

$$L = L_0(1 + \alpha(T - T_0)) + k \sin(U), \quad (71)$$

in cui T (temperatura) ed U sono due variabili aleatorie, supposte incorrelate. L indica una lunghezza espressa in m , $L_0 = 3,5m$ è il valore nominale di L a $T = T_0 = 293,15^\circ K$, $\alpha = 0,001^\circ K^{-1}$ e $k = 0,01m$. Alle variabili di ingresso si assegnano le seguenti pdf:

Tab. 4.7 - Assegnazione delle pdf in ingresso

X_i	pdf	valore atteso	deviazione standard
T	Gaussiana	$293,15^\circ K$	$2^\circ K$
U	Rettangolare	π	$\pi/2\sqrt{3}$

Per questo esempio, è stata calcolata l'incertezza tipo analiticamente, col metodo LPU al primo ordine e col metodo di Integrazione Diretta sfruttando le (62), (63), (64). I risultati ottenuti sono riportati in tab. 4.8.

Tab. 4.8 - Risultati ottenuti applicando l'LPU1, il metodo analitico e quello di Integrazione Diretta

Metodo	Valore atteso (m)	Incertezza (m)
LPU1	3,5	0,0115
Calcolo analitico	3,5	0,0099
Integrazione Diretta	3,5	0,0099

Analizzando i risultati, si deduce che il metodo LPU al primo ordine fornisce il corretto valore atteso, ma porta a una sovrastima dell'incertezza del misurando rispetto al calcolo condotto per via analitica che risulta essere esatto, mentre il metodo di Integrazione Diretta risulta essere molto più preciso.

Caso 5

Si consideri la rappresentazione, da polare a rettangolare, di un'impedenza capacitiva.

La parte reale e la parte immaginaria di tale impedenza sono espresse da:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\dot{Z}) = m \cos(\varphi) \\ \operatorname{Im}(\dot{Z}) = m \sin(\varphi) \end{cases} \quad (72)$$

in cui m e φ sono due variabili aleatorie incorrelate alle quali sono assegnate le seguenti pdf:

Tab. 4.9 - Valori assegnati a modulo e fase dell'impedenza capacitiva

X_i	pdf	valore atteso	deviazione standard
m	Gaussiana	1000 Ω	1 Ω
φ	Gaussiana	$-\pi/2$	$\pi/40$

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva con i risultati ottenuti tramite una simulazione Monte Carlo (MC) e quelli ottenuti usando la Trasformata Unscented (UT):

Tab. 4.10 - Risultati ottenuti tramite MC e UT

$\operatorname{Re}(\dot{Z})$	Valore atteso (Ω)	Incertezza
MC	-0.03	78.22
UT	0.000	78.29
$\operatorname{Im}(\dot{Z})$	Valore atteso (Ω)	Incertezza
MC	-996.927	4.44
UT	-996.920	4.46

Nella tab. 4.11 sono riportati i risultati ottenuti con il metodo di Integrazione Diretta, sfruttando le (62),(63),(64):

Tab. 4.11 - Risultati ottenuti con il metodo di Integrazione Diretta

$\text{Re}(\dot{Z})$	Valore atteso (Ω)	Incetezza
Integrazione Diretta	0.000	78.2982
$\text{Im}(\dot{Z})$	Valore atteso (Ω)	Incetezza
Integrazione Diretta	-996.9205	4.4612

Caso 6

Si consideri il processo di misura descritto da:

$$Y = \sin(X_1) + \exp(X_2 + 3) \quad (73)$$

in cui le variabili aleatorie di ingresso $X_1 \sim N(0;0.3)$ e $X_2 \sim N(0;0.1)$ siano congiuntamente Gaussiane con coefficiente di correlazione $\rho = 0,9$. In tal caso è necessaria la risoluzione di un integrale in due dimensioni. Per questo caso è stato usato il metodo dei trapezi a due dimensioni [47]. I risultati ottenuti con il metodo di Integrazione Diretta sono di seguito riportati:

Tab. 4.12 - Risultati ottenuti con il metodo di Integrazione Diretta

	Valore atteso	Incetezza
Integrazione Diretta	20.1862	2.2846

4.5 Tempi macchina del metodo di Integrazione Diretta

Tutti i casi esaminati sono stati risolti con l'ausilio di un algoritmo di integrazione numerico implementato in ambiente Matlab e utilizzato su una macchina Intel Pentium 4 con processore a 3,2 GHz, avente memoria RAM 512 MB DDR. Di seguito è riportata una tabella (tab. 4.13) riassuntiva dei tempi macchina per ogni caso esplorato.

Tab. 4.13 - Tabella riassuntiva dei tempi macchina per i sei casi esplorati

	Tempo impiegato (sec.)
Caso 1	0,312
Caso 2	0,297
Caso 3	0,5
Caso 4	0,609
Caso 5	0,703
Caso 6	2,578

Oltre ad essere evidente il fatto che i risultati sono in ottimo accordo con quelli precedenti, si aggiunge che, in ambiente MATLAB, i tempi macchina risultano dell'ordine dei decimi di secondo.

4.6 Proposta di studio

Lo studio sperimentale che viene qui proposto riguarda la possibilità di applicare la nuova metodologia di calcolo alla valutazione dell'incertezza di misura di un tappetino (o piastra) sottorotaia testato a fatica nel laboratorio del DPGI.

4.6.1 Descrizione del tappetino

Il tappetino sottorotaia è realizzato in Sylomer (poliuretano elastomerico) SB75010, di spessore 5mm, e garantisce una rigidità statica (c_{stat}) di circa 235 kN/mm misurata tra 20 a 95 kN (intesa come la secante che parte da $2P_0 = 10$ kN e calcolata tra 20 e 95 kN, vedi fig. 4.1) e una rigidità dinamica (c_{dyn}) di circa 450 kN/mm.

Il Sylomer è un elastomero poliuretano a celle miste ottenuto dalla trasformazione di polioliene con isocianato. Il materiale standard Sylomer V ha una densità di circa 650 kg/m³. Il Sylomer SB 75010 ha una densità maggiore, pari a 850 +/- 15% kg/m³, per la sua struttura reticolare più fitta, simile a quella dei più compatti materiali poliuretano, con molte meno celle di quelle del Sylomer V. Infatti, l'esame microscopico della struttura rivela la presenza di una struttura cellulare chiusa.

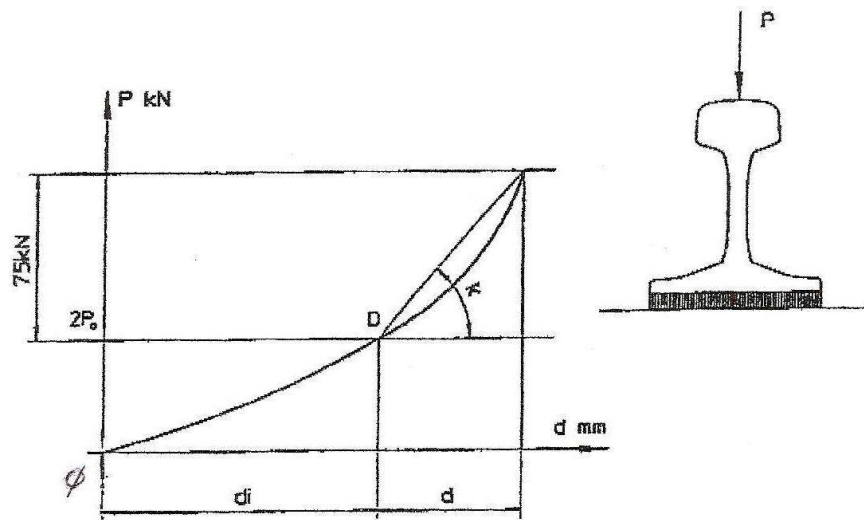


Fig. 4.1 - Schema per la definizione della rigidità statica

Le caratteristiche estrinseche riguardano lo spessore, che risulta pari a 5mm +/- 0,5mm, mentre quelle meccaniche del componente sono:

- $c_{stat} = 235 (+15/-35)$ kN/mm.
- $c_{dyn} = 450 (+150/-150)$ kN/mm.
- Resistenza a trazione ≥ 9 N/mm²
- Allungamento $\geq 250\%$
- Densità 850 kg/m³ +/- 15%

Tra il polimero di partenza e quello finale non si manifesta alcuna perdita delle caratteristiche meccaniche dato che la materia sintetica viene ottenuta da materia prima liquida.

Il componente non necessita, né di condizionamento, né di ulteriori trattamenti termici.

4.6.2 Descrizione dell'attrezzatura di prova

La macchina di prova utilizzata è una macchina servoidraulica monoassiale a controllo digitale modello *INSTRON 8502 PLUS* con cella di carico (mod. 2518-110) da 250 kN in dinamico e 550 kN in statico. La macchina, dopo l'accostamento dell'attuatore al particolare da testare, viene azionata in controllo di carico, mentre quattro sensori laser del tipo *KEYENCE LK 086* con controllore *KEYENCE LK 2111* e alimentazione *KEYENCE MS-H100* da 4,5 A misurano gli spostamenti.

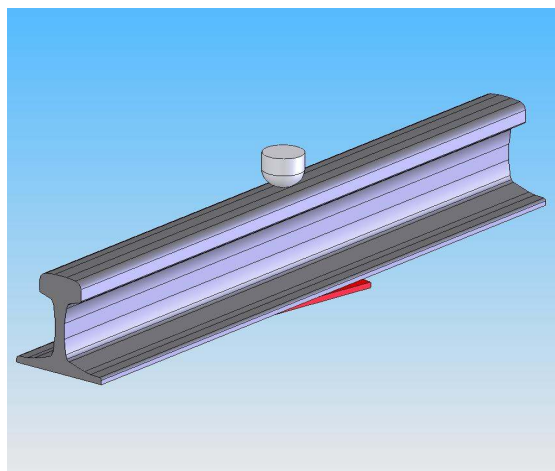


Fig. 4.2 - Modello di rotaia e punzone con tappetino sottorotaia

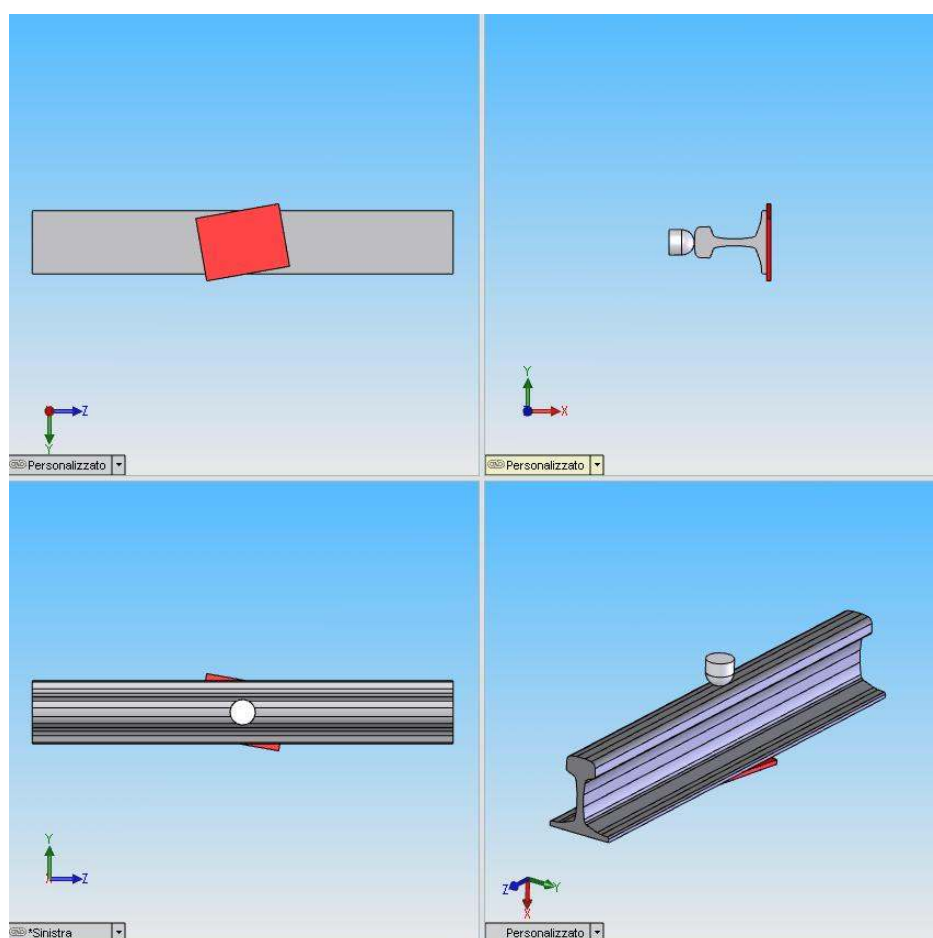


Fig. 4.3 - Viste diverse del sistema tappetino-rotaia-punzone

La centralina di acquisizione (chassis) è del tipo NATIONAL INSTRUMENTS NISCXI-1000 dotata di morsettiera NISCXI-1314, PCI 6521 e scheda di acquisizione a 18 canali in simultanea NISCXI-1520. I dati vengono elaborati da un pc Pentium 4 da 3,2 Gb, 100 Gb di HD e memoria RAM da 1 Gb.

Per effettuare una corretta misurazione dello spostamento relativo tra la rotaia e la piastra per controrotaia, collegate tra loro mediante il sistema d'attacco, si utilizzano quattro bracci magnetici resi solidali alla piastra, ed accoppiati tra loro due a due in maniera tale da non inglobare nella misurazione lo spostamento dovuto alla flessione di un'estremità rispetto all'altra. Sull'asta che collega i due magneti, si fissa la piastra contenente i sensori laser.

Sfruttando questo sistema si è in grado di misurare lo spostamento della rotaia in quattro punti, limitando però l'errore causato da una non corretta aderenza tra la piastra e la traversa.

Dopo aver posizionato il blocco da testare perfettamente al centro dell'attuatore, e posizionati i sensori in maniera opportuna, si portano a contatto l'attuatore e il provino, portando il sistema in controllo di carico.

La macchina di prova si imposta in maniera tale da compiere n. 6 cicli di carico di forma trapezoidale; la salita prevede una velocità di 0.9 kN/s fino al carico massimo di 85 kN, questo carico persiste per 1 s dopo il quale inizia la discesa con una velocità di 1 kN/s fino al raggiungimento di 0 kN dove il carico permane per 30 secondi, utili all'azzeramento dello spostamento letto dai sensori laser.

4.6.3 Metodologie di calcolo dell'incertezza delle misure di rigidità del tappetino

Il modo in cui il calcolo dell'incertezza viene effettuato dipende fortemente dalla funzione di trasferimento, che dai dati in input (forza applicata, ma anche fattori di "rumore" come temperatura, umidità, errori di posizionamento etc.) fornisce l'output (la rigidità misurata).

Nel caso in cui la funzione di trasferimento sia almeno approssimativamente lineare è possibile applicare le procedure presenti nella GUM (Capitolo 3, par. 3.4.1). Funzioni di trasferimento non lineari possono essere affrontate con metodi previsti nel Supplemento 1 della GUM o con la trasformata Unscented o, ancora, con l'Integrazione Diretta.

Se la funzione di trasferimento non è nota a priori, si fa ricorso ad un algoritmo in grado di determinarla. Uno di questi è la regressione simbolica.

4.6.3.1 Un metodo per la determinazione della funzione di trasferimento: Regressione Simbolica per Codifica Lineare

Quando non si conosca la funzione di trasferimento, è possibile determinarla a partire da un insieme di dati in input e dai corrispondenti dati in output. Questa operazione può essere effettuata in diversi modi; ad esempio possono essere applicate tecniche di Regressione Lineare o non lineare, Reti Neurali o la Regressione Simbolica. Tra questi strumenti il più potente e flessibile è senz'altro la Regressione Simbolica che ha, però, il difetto di richiedere enormi risorse computazionali.

La Regressione Simbolica consiste nella creazione di una formula approssimante i dati a partire da alcuni blocchi funzionali elementari, che vengono combinati in una struttura evoluta con tecniche derivate dagli algoritmi genetici.

Le strutture funzionali elementari possono essere, ad esempio, l'operatore addizione, l'operatore moltiplicazione, $\sin(x)$, costanti, variabili, etc. Il metodo "tradizionale" per la regressione simbolica si basa sulla programmazione genetica [51] e prevede l'evoluzione di una struttura ad albero attraverso scambi di rami tra individui di una popolazione di soluzioni candidate.

La Codifica Lineare, sviluppata presso il DPGI da Paolo Pinto, Maurizio Mercurio e Pasquale Memmolo, è un metodo alternativo che sfrutta l'evoluzione genetica di una struttura lineare a posizioni fisse, utilizzando occasionalmente anche un algoritmo di ottimizzazione locale basato sulla mutazione. Benchè i test siano ancora in corso, tale metodo sembra fornire prestazioni superiori a quelle della programmazione genetica.

Di solito, per poter applicare la regressione simbolica, occorrono molti dati. Se si hanno i dati sufficienti per fare una Regressione Simbolica, molto probabilmente si hanno anche i dati per una incertezza di tipo A. Tuttavia, la conoscenza di un modello matematico può servire a valutare l'impatto che avrà sull'incertezza la variazione nell'incertezza di uno o più parametri di input, mentre, nel caso in cui ci si limiti al calcolo dell'incertezza di tipo A, tale valutazione non sarebbe possibile che a posteriori e con la ripetizione della campagna sperimentale.

4.6.3.2 Esempi di applicazione di Regressione Simbolica per Codifica Lineare

Una dimostrazione della validità della Codifica Lineare può essere ricavata dall'osservazione dei risultati di seguito presentati. In questi esempi, di volta in volta, si è simulato al computer un processo di misura, fornendo al software gli input e gli output generati da una funzione di trasferimento. In ciascuna occasione il software è stato in grado di ritrovare, con estrema precisione, la funzione di trasferimento sottostante. In ognuna delle prove si è evoluta la popolazione per 100 generazioni; le differenze nei tempi di calcolo sono da imputare al diverso

numero di occorrenze dell'operazione di ottimizzazione locale che scatta al verificarsi di particolari condizioni. Seguono i risultati dei test.

Test di Regressione Simbolica

Test 1: 1 variabile

Funzione obiettivo: $y = 3 \cdot \text{atan}(x)$ $x = 0.1:0.1:5$;

Popolazione = 5000 individui;

Prova 1:

Funzione ottenuta = $C1 \cdot 0 \cdot (\sin(x)^0) \cdot (\sin(x)^0) + C2 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^1) \cdot (\text{atan}(x)^0)$

$c1 = 0.36182$;

$c2 = 3$;

Tempo impiegato: 19,643 minuti

Iterazioni = 100

Prova 2:

Funzione ottenuta = $C1 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^1) \cdot (\cos(x)^0) + C2 \cdot 1 \cdot (\sin(x)^0) \cdot (\text{atan}(x)^1)$

$c1 = 1.5845$;

$c2 = 1.4155$;

Tempo impiegato: 8,9406 minuti

Iterazioni = 100

Prova 3:

Funzione ottenuta = $C1 \cdot 0 \cdot (\text{atan}(x)^0) \cdot (\text{atan}(x)^0) + C2 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^1) \cdot (\cos(x)^0)$

$c1 = 0.75377$;

$c2 = 3$;

Tempo impiegato: 13,148 minuti

Iterazioni = 100

Prova 4:

Funzione ottenuta = $C1 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^1) \cdot (\text{atan}(x)^0) + C2 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^0) \cdot (\text{atan}(x)^1)$

$c1 = 0.83325$;

$c2 = 2.1668$;

Tempo impiegato: 13,472 minuti

Iterazioni = 100

Prova 5:

Funzione ottenuta = $C1 \cdot 1 \cdot (\sin(x)^0) \cdot (\text{atan}(x)^1) + C2 \cdot 1 \cdot (\text{atan}(x)^0) \cdot (\text{atan}(x)^1)$

$c1 = 0.38853$;

$c2 = 2.6115$;

Tempo impiegato: 12,593 minuti

Iterazioni = 100

Test 2: 2 variabili

Funzione obiettivo: $y = L0 \cdot (1 + \alpha \cdot Dt) + k \cdot \sin(U)$ Dt Gaussiana, U uniforme
(vedi Caso 4, par. 4.4.1 precedente);
Popolazione = 5000;
Iterazioni = 100

Prova 1:

Scarto quadratico medio = 0,00065222
Tempo impiegato: 608,5308 minuti
Iterazioni = 100

Prova 2:

Scarto quadratico medio = 0.00048272
Tempo impiegato: 2116,9871 minuti
Iterazioni = 100

4.6.4 La valutazione dell'incertezza di misura

Volendo fornire uno schema molto semplificato dell'attrezzatura, al fine di avere una idea su come scegliere e gestire le varie grandezze di ingresso e le correlazioni eventualmente presenti tra esse, si riposta uno schema tipo diagramma di Ishikawa.

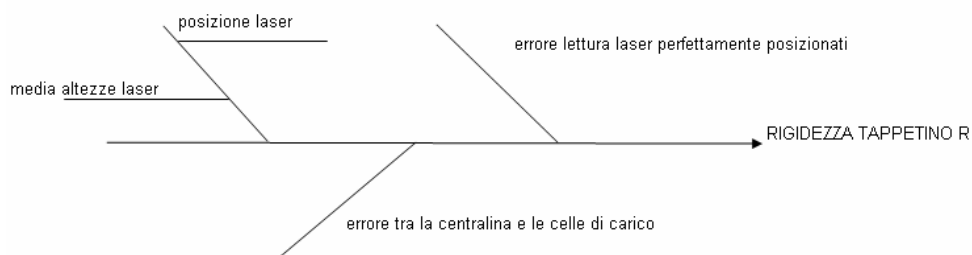


Fig. 4.4 - Diagramma che indica sommariamente i fattori di influenza sulla misura della rigidità del tappetino

La rigidità del tappetino viene ricavata da una relazione del tipo:

$$R = \frac{S}{F} , \quad (74)$$

ossia come rapporto tra uno spostamento e una forza. A sua volta, lo spostamento è funzione della posizione dei quattro laser, mentre la forza è legata alla lettura della centralina di acquisizione:

$$S = f(laser); \quad F = g(centralina) . \quad (75)$$

Tali scelte di dipendenza sono del tutto arbitrarie e seguono il modello estremamente semplificato di cui si è già spiegato sopra.

Si genera una forza F con la relativa funzione di densità di probabilità (pdf). Tale forza produce lo schiacciamento del tappetino secondo una legge variabile che dipende da un angolo α rappresentante la deviazione della posizione del tappetino rispetto alla mezzzeria del piano orizzontale contenente la testa del binario. Anche l'angolo α avrà una propria pdf. Facendo il prodotto tra la forza effettivamente generata e la rigidità del tappetino otteniamo il valore dello schiacciamento. Quest'ultimo, chiaramente, non sarà quello vero essendo la funzione della posizione dei laser al momento della misurazione e avente pdf di tipo Gaussiano. Eseguendo il rapporto tra:

$$R = \frac{\text{media schiacciamenti}}{\text{forza}} \quad (76)$$

si ottiene un valore della rigidità di cui posso calcolare l'incertezza.

Con l'ausilio di MATLAB si è cercato di trovare un programma che, andando a ritroso, si ricostruisca la pdf dei laser e degli errori di allineamento. La pdf dell'errore riguardante il carico applicato F sarà considerato noto a priori e ricavato dai certificati di taratura della cella di carico e della centralina di acquisizione.

CONCLUSIONI

La descrizione dettagliata della teoria dell'incertezza di misura e delle relative metodologie di calcolo finora proposte, nonché la descrizione puntuale di alcuni dei principali strumenti di misura utilizzati durante varie sessioni di taratura e dei parametri che più significativamente incidono sulla precisione di ogni misura hanno occupato non poco spazio della tesi, sia per la complessità del tema, sia, soprattutto, per chiarire il contesto nel quale si va a collocare il contributo innovativo di ricerca che si è inteso fornire nell'affinamento delle tecniche di calcolo dell'incertezza e che viene descritto nella parte finale del presente lavoro.

Detto contributo riguarda la metodologia di calcolo dell'incertezza, a prescindere dal rispetto delle ipotesi necessarie all'utilizzo dei metodi GUM. In particolare, esso consiste nel valutare l'incertezza tipo del misurando a partire dalla definizione matematica di varianza, con una tecnica che garantisce rapidità e precisione superiori a quelle consentite dal metodo Monte Carlo.

Il nuovo metodo, detto "Metodo di Integrazione Diretta", è stato utilizzato in via del tutto sperimentale per la valutazione dell'incertezza di misura associata al calcolo della rigidità di un tappetino sottomotore. Per questo, si è costruito uno schema virtuale semplificato dell'attrezzatura di prova, con la scelta arbitraria di alcuni parametri tra quelli che sono sembrati i più significativi, e si è descritta una probabile procedura applicabile nella pratica.

I risultati ottenuti sono molto incoraggianti, in quanto il nuovo metodo presenta notevoli vantaggi rispetto alle tecniche finora utilizzate, per l'elevata precisione dei risultati e la notevole riduzione dei tempi macchina.

La prosecuzione del lavoro potrebbe dare un impulso non trascurabile all'attività scientifica che gravita attorno al settore metrologico e della produzione.

APPENDICE

RICHIAMI DI STATISTICA

Media e Varianza

Siano X_1, X_2, \dots, X_n n variabili aleatorie (v.a.) costruite su uno spazio di probabilità. Si consideri la trasformazione Y delle n v.a. mediante una funzione di trasformazione g :

$$Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

È possibile calcolare la media e la varianza di Y applicando il *Teorema fondamentale della media* nel caso di n v.a. aventi funzione di densità di probabilità (pdf) congiunta $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$E(Y) = E(g(X_1, X_2, \dots, X_n)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_n) f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

$$\text{var}(Y) = E((Y - E(Y))^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} (g(x_1, x_2, \dots, x_n) - E(Y))^2 f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (3)$$

È evidente che se la (1) è una funzione che descrive il processo di misura di una grandezza Y a partire dalla conoscenza “statistica” delle variabili di ingresso X_1, X_2, \dots, X_n che influenzano tale processo, è possibile calcolare l’incertezza tipo composta del misurando mediante la relazione:

$$u_c(Y) = \sqrt{\text{var}(Y)} \quad (4)$$

Variabili Aleatorie Indipendenti

Le v.a. X_1, X_2, \dots, X_n si dicono *indipendenti* se e solo se la funzione di distribuzione cumulativa (CDF) congiunta delle n v.a. si fattorizza nel prodotto delle CDF marginali:

$$F_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{X_1}(x_1) F_{X_2}(x_2) \dots F_{X_n}(x_n) \quad \forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n \quad (5)$$

Chiaramente la fattorizzazione della CDF congiunta equivale a quella della pdf congiunta, per cui si ha:

$$f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n) \quad \forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n \quad (7)$$

È possibile dimostrare che se si considera la trasformazione cosiddetta “diagonale”:

$$\begin{cases} Z_1 = g_1(X_1) \\ Z_2 = g_2(X_2) \\ \dots\dots\dots \\ Z_n = g_n(X_n) \end{cases} \quad (8)$$

e le v.a. X_1, X_2, \dots, X_n sono indipendenti, allora lo sono anche le v.a. Z_1, Z_2, \dots, Z_n .

Si può anche definire il concetto di indipendenza a coppie e indipendenza a gruppi.

Indipendenza a coppie: le v.a. X_1, X_2, \dots, X_n si dicono indipendenti a coppie se e solo se

$$F_{X_i, X_j}(x_i, x_j) = F_{X_i}(x_i) F_{X_j}(x_j) \quad \forall i \neq j \quad \forall (x_i, x_j) \in R^2 \quad (9)$$

Chiaramente l’indipendenza implica l’indipendenza a coppie, mentre il viceversa non è vero salvo il caso in cui le v.a. siano congiuntamente gaussiane.

Indipendenza a gruppi: le v.a. X_1, X_2, \dots, X_k si dicono indipendenti dalle v.a. $X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_n$ se e solo se $\forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$

$$F_{X_1 X_2 \dots X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{X_1 X_2 \dots X_k}(x_1, x_2, \dots, x_k) F_{X_{k+1} X_{k+2} \dots X_n}(x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n) \quad (10)$$

Matrice di Correlazione

Le correlazioni tra le v.a. X_1, X_2, \dots, X_k possono essere calcolate tramite la relazione:

$$\text{Corr}(X_i, X_j) = E(X_i X_j) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_i x_j f_{X_i X_j}(x_i, x_j) dx_i dx_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

e raccogliendo questi termini in una matrice quadrata $n \times n$ R_X che prende il nome di *Matrice di Correlazione* del vettore $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$. Come si evince, per calcolare tale matrice non è necessaria la conoscenza della pdf congiunta delle n v.a. ma basta conoscere la congiunta del secondo ordine di ogni coppia di componenti del vettore X .

Matrice di Covarianza

Le covarianze tra le v.a. X_1, X_2, \dots, X_k possono essere calcolate tramite la relazione:

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = E((X_i - E(X_i))(X_j - E(X_j))) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - E(X_i))(x_j - E(X_j)) f_{X_i X_j}(x_i, x_j) dx_i dx_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

e raccogliendo questi termini in una matrice quadrata $n \times n$ C_X che prende il nome di *Matrice di Covarianza* del vettore $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T$. Come si evince, per calcolare tale matrice non è necessaria la conoscenza della pdf congiunta delle n v.a. ma basta conoscere la congiunta del secondo ordine di ogni coppia di componenti del vettore X .

È chiaro che la relazione tra correlazione e covarianza di due v.a. X_i, X_j sussiste la seguente relazione:

$$Cov(X_i, X_j) = Corr(X_i, X_j) - E(X_i)E(X_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

NOTA: sia matrice di correlazione che matrice di covarianza sono simmetriche.

Incorrelazione

Le v.a. X_1, X_2, \dots, X_k si dicono incorrelate se e solo se:

$$Cov(X_i, X_j) = 0 \quad \forall i \neq j \quad (14)$$

Da ciò si deduce anche che:

$$Corr(X_i, X_j) = E(X_i X_j) = E(X_i)E(X_j) \quad \forall i \neq j \quad (15)$$

È chiaro che l'indipendenza implica l'incorrelazione (in realtà basta l'indipendenza a coppie delle v.a. X_1, X_2, \dots, X_k per dire che sono incorrelate), ma non vale il viceversa, salvo il caso in cui le v.a. siano congiuntamente gaussiane.

Risultati da Sfruttare

Consideriamo per semplicità il caso di due v.a. Sapendo che, data una v.a. V , si ha:

$$E(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} v f_V(v) dv \quad (16)$$

$$\text{var}(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} (v - E(V))^2 f_V(v) dv \quad (17)$$

Caso 1

Si considerino due v.a. X_1 e X_2 correlate. In tal caso sussistono le seguenti relazioni per medie e varianze delle trasformazioni $Y = X_1 + X_2$ e $Z = X_1 X_2$:

$$E(Y) = E(X_1 + X_2) = E(X_1) + E(X_2) \quad (18)$$

$$E(Z) = E(X_1 X_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{var}(Y) &= \text{var}(X_1 + X_2) = \text{var}(X_1) + \text{var}(X_2) + 2\text{Cov}(X_1, X_2) = \\ &= \text{var}(X_1) + \text{var}(X_2) + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_1 - E(x_1))(x_2 - E(x_2)) f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{var}(Z) = \text{var}(X_1 X_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_1 x_2 - E(X_1 X_2))^2 f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (21)$$

Conclusione: devo avere la congiunta; se però sono nel caso in cui $Y = X_1 + X_2$ bastano le marginali e la covarianza delle due v.a.

Caso 2

Si considerino due v.a. X_1 e X_2 incorrelate. In tal caso sussistono le seguenti relazioni per medie e varianze delle trasformazioni $Y = X_1 + X_2$ e $Z = X_1 X_2$:

$$E(Y) = E(X_1 + X_2) = E(X_1) + E(X_2) \quad (22)$$

$$E(Z) = E(X_1 X_2) = E(X_1)E(X_2) \quad (23)$$

$$\text{var}(Y) = \text{var}(X_1 + X_2) = \text{var}(X_1) + \text{var}(X_2) \quad (24)$$

$$\text{var}(Z) = \text{var}(X_1 X_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_1 x_2 - E(X_1)E(X_2))^2 f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (25)$$

Conclusione: devo avere la congiunta; se però sono nel caso in cui $Y = X_1 + X_2$ bastano le marginali.

Caso 3

Si considerino due v.a. X_1 e X_2 indipendenti. In tal caso sussistono le seguenti relazioni per medie e varianze delle trasformazioni $Y = X_1 + X_2$ e $Z = X_1 X_2$:

$$E(Y) = E(X_1 + X_2) = E(X_1) + E(X_2) \quad (26)$$

$$\text{var}(Y) = \text{var}(X_1 + X_2) = \text{var}(X_1) + \text{var}(X_2) \quad (28)$$

$$\text{var}(Z) = \text{var}(X_1 X_2) = \text{var}(X_1)E^2(X_2) + \text{var}(X_2)E^2(X_1) + \text{var}(X_1)\text{var}(X_2) \quad (29)$$

NOTA: i risultati si estendono facilmente al caso di più v.a. e a combinazioni miste delle stesse.

Dato un set di n v.a. X_1, X_2, \dots, X_n con pdf congiunta $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Possiamo sfruttare il concetto di pdf condizionale e di legge di probabilità composta per fattorizzare la pdf congiunta. Infatti sussiste la seguente relazione, che va sotto il nome di *regola della catena*, che con successivi condizionamenti permette di fattorizzare la pdf congiunta nel prodotto di n pdf condizionali monodimensionali:

$$f_{X_1 X_2 \dots X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2 | x_1) f_{X_3}(x_3 | x_1, x_2) \dots f_{X_n}(x_n | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \quad (30)$$

È chiaro che se si avessero a disposizione tutte le pdf condizionate che servo si potrebbe calcolare la pdf congiunta anche se non c'è indipendenza. È altrettanto evidente che, nel caso di indipendenza delle v.a. si ha:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{X_2}(x_2 | x_1) = f_{X_2}(x_2) \\ f_{X_3}(x_3 | x_1, x_2) = f_{X_3}(x_3) \\ \dots\dots\dots \\ f_{X_n}(x_n | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = f_{X_n}(x_n) \end{array} \right. \quad (31)$$

Test di Indipendenza e Pdf Condizionali Empiriche

Supponiamo di avere n v.a. X_1, X_2, \dots, X_n e di conoscere la pdf marginale di X_1 , $f_{X_1}(x_1)$. Bisogna estrarre da tale pdf m campioni $\{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}\}$ e per ognuno di essi stimare la pdf condizionata della v.a. X_2 ; in tal caso si costruisce la seguente applicazione:

$$\Psi_1 : \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}\} \rightarrow \{f_{X_2}(x_2 | x_{11}), f_{X_2}(x_2 | x_{12}), \dots, f_{X_2}(x_2 | x_{1m})\} \quad (32)$$

Se tale funzione è “costante” al variare di x_{1i} per $i = 1, 2, \dots, m$ allora le v.a. X_1 e X_2 sono indipendenti e risulta:

$$f_{X_2}(x_2 | x_{1i}) = f_{X_2}(x_2) \quad \forall i \quad (33)$$

In caso contrario le v.a. X_1 e X_2 non sono indipendenti, ed il condominio di Ψ_1 fornisce una stima della pdf condizionale cercata.

Consideriamo ora la coppia di v.a. X_1 e X_2 con pdf congiunta pari a $f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) = f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2 | x_1)$. Si estraggono m coppie di punti (x_{1i}, x_{2i}) e per ognuna di essa si stima la pdf condizionata della v.a. X_3 ; in tal caso si costruisce la seguente applicazione:

$$\Psi_2 : \{(x_{11}, x_{21}), (x_{12}, x_{22}), \dots, (x_{1m}, x_{2m})\} \rightarrow \{f_{X_3}(x_3 | x_{11}, x_{21}), f_{X_3}(x_3 | x_{12}, x_{22}), \dots, f_{X_3}(x_3 | x_{1m}, x_{2m})\} \quad (34)$$

Se tale funzione è “costante” al variare di (x_{1i}, x_{2i}) per $i = 1, 2, \dots, m$ allora la v.a. X_3 è indipendente dalla coppia di v.a. X_1 e X_2 e risulta:

$$f_{X_3}(x_3 | x_{1i}, x_{2i}) = f_{X_3}(x_3) \quad \forall i \quad (35)$$

In caso contrario le v.a. X_1, X_2 e X_3 non sono indipendenti, ed il condominio di Ψ_1 fornisce una stima della pdf condizionale cercata.

Iterando questo ragionamento è possibile costruire le pdf condizionali e di conseguenza stimare la pdf congiunta¹.

Integrazione Numerica Monodimensionale

Ci si pone il problema di integrare in un intervallo $[a, b]$, mediante un algoritmo numerico, una funzione $y = f(x)$ continua in tale intervallo:

$$J(f) = \int_a^b f(x) dx \quad (36)$$

L'intervallo $[a, b]$ viene partizionato in n sottointervalli $I_h = [x_{h-1}, x_h]$ con $h = 1, 2, \dots, n$ in cui $x_0 = a$ ed $x_n = b$. Indichiamo con $\Delta x_h = x_h - x_{h-1}$ la lunghezza di ogni sottointervallo (se la partizione fosse uniforme allora tutti i sottointervalli avrebbero stessa lunghezza, ovvero $\Delta x_h = \Delta x \quad \forall h$).

Per la proprietà di additività dell'integrale si può scrivere:

$$J(f) = \int_a^b f(x) dx = \sum_{h=1}^n \int_{I_h} f(x) dx \quad (37)$$

Pertanto vanno risolti n integrali; il singolo integrale va risolto suddividendo l'intervallo Δx_h in $k+1$ punti distinti e si interpola la funzione $f(x)$ con un polinomio di grado k , in modo da poter calcolare l'integrale analiticamente:

$$\int_{I_h} f(x) dx \approx \int_{I_h} p_k^{(h)}(x) dx \quad (38)$$

¹ *Facendo un ragionamento intuitivo si potrebbe stabilire la dipendenza delle v.a. facendo solo 3 estrazioni alla volta: una che riguarda un evento poco probabile, un'altra che riguarda un evento con probabilità "media" e l'ultima che riguarda l'evento più probabile (ad esempio la media di quella distribuzione). In tal modo, se c'è effettivamente dipendenza tra le v.a., si dovrebbe notare una variazione ragionevole dei "valori" assunti dalla funzione Ψ_K .*

Sostituendo la (3) nella (2) si ha:

$$J(f) \approx \sum_{h=1}^n \int_{I_h} p_k^{(h)}(x) dx \quad (39)$$

La formula (3) risulta esatta, per costruzione, per polinomi di grado almeno k , cioè ha *grado di precisione almeno k* . In certi casi particolari è possibile avere anche un grado di precisione maggiore di k . Il grado di precisione può essere ricavato, nell'ipotesi semplificativa di partizione uniforme dell'intervallo $[a,b]$, come:

$$\frac{E}{\Delta x} \propto O(\Delta x^k) \quad (40)$$

dove E è l'errore globale associato alla (4); k rappresenta il grado di precisione.

Esistono varie possibilità per interpolare la $f(x)$; la scelta va fatta in base al tipo di integrale che bisogna calcolare in quanto l'errore locale che si commette approssimando $f(x)$ con un polinomio dipende dal particolare andamento di $f(x)$ nel sottointervallo Δx_h .

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI CEI 9: “*Guida all’espressione dell’incertezza di misura*”, Milano, 1997.
- [2] UNI CEI 9: “*Guide to expression of uncertainty in measurement, supplement 1, Numerical Methods for the propagation of distributions*”, 2004.
- [3] Alenia Aeronautica : “*Guida pratica per il calcolo dell’incertezza di misura*”, Pomigliano D’Arco (NA), Dicembre 2003.
- [4] A. Bray :”*Estensimetri elettrici a resistenza*”, CNR, Roma, 1965.
- [5] SIT/Tec-003/03 “*Linea guida per la taratura di bilance*” rev. 00 2003/01/10.
- [6] SIT/Tec-008/05 “*Linea guida per la valutazione dell’incertezza di taratura di strumenti elettrici multifunzione*” rev. 01 2005/09/14.
- [7] SIT/Tec-009/05 “*Guida per la taratura di misuratori di pressione*” rev. 00 2005/04/18.
- [8] SIT/Tec-010/05 “*Guida per la taratura di dispositivi per la misura del momento torcente (torsimetri) e determinazione dell’incertezza di taratura*” rev. 00 2005/04/24
- [9] SIT/Tec-011/05 “*Guida per la valutazione delle incertezze nella catena di misura della forza: dai campioni nazionali alle macchine di taratura*” rev.00 2005/04/24.
- [10] SIT/Tec-012/05 “*L’incertezza di taratura delle macchine prova materiali (mpm)*” rev.00 2005/06/06.
- [11] SIT/Tec-013/05 “*Contributi di incertezza derivanti dai risultati di taratura dei trasduttori di forza e stima delle varianze*” rev. 00 2005/06/06.
- [12] Documento SINAL DT-0002 “*Guida per la valutazione e la espressione dell’incertezza nelle misurazioni*” rev. 1.
- [13] Documento SINAL DT-0002/2 “*Esempi applicativi di valutazione dell’incertezza nelle misurazioni meccaniche*” rev. 0.
- [14] Documento SINAL EA-4/02 “*Expression of the uncertainty of measurement in calibration*” Rev. 00.
- [15] L. Thione, “*Qualità metrologica e accreditamento*”, relazione FIDEA, Milano, 18/11/04.

- [16] A. Brunelli, “*Riferibilità delle misure e valutazione delle incertezze*” Ed. EMIT-LAS, Milano, Settembre 1996.
- [17] M. Parvis, “*Considerazioni sull’incertezza nelle misure*”, Politecnico di Torino, Torino, 1999.
- [18] P. Daponte, “*Stima dell’incertezza di misura secondo il modello statistico*”, 1999.
- [19] S.L.R. Ellison (LGC,UK), M. Rosslein (EMPA Switzerland), A. Williams (UK), “*Quantifying uncertainty in analytical Measurement*”, EURACHEM/CITAC Guide, seconda edizione, 2000.
- [20] A.Carullo, “*Concetti di base su misurazione e incertezza*”, Roma, 13 Febbraio 2004.
- [21] ASTM E74-83, “*Standard practice of calibration of force-measuring instruments for verifying the load indication of testing machines*”.
- [22] ASTM E74-00a, “*Standard practice of calibration of force-measuring instruments for verifying the load indication of testing machines*”.
- [23] C. Ferrero, C. Marinari, P. Iudici, documento del CNR e Istituto di Metrologia “G. Colonnetti”, “*Valutazione delle caratteristiche metrologiche della macchina a confronto MTC 50 del Laboratorio Alenia-Aerospazio (Pomigliano D’Arco)*”, Torino, 20/3/2004.
- [24] G. Zingales, “*Misure Elettroniche - metodi e strumenti*”, UTET, Torino, 1992.
- [25] C. Offelli, D. Petri, “*Lezioni di Strumentazione Elettronica*”, Consorzio NETTUNO, Città Studi Edizioni, 1994.
- [26] G. Biondo, E. sacchi, “*Manuale di elettronica e telecomunicazioni*” seconda edizione, Ed. Ulrico Hoepli Milano, Milano 1986.
- [27] A. Liberatore, S. Manetti, “*Circuiti integrati analogici digitali e microprocessori*”, Aprile 1985.
- [28] A. Cupido, G. Lotti, “*Elettronica generale*”, vol.secondo, Ed. La Tecno Editrice-Fermo, Fermo (AP), Maggio 1974.
- [29] J. Millman, C. C. Halkias, “*Dispositivi e circuiti elettronici*”, Ed. Boringhieri, Torino, Dicembre 1975.

- [30] “*Lezioni di elettronica nucleare*”, CUEN, Napoli, 1980.
- [31] F. Cascetta, P. Vigo, “*Introduzione alla metrologia*”, Ed. Liguori, Napoli, febbraio 1989.
- [32] (ebook) – “*The ASME Measurement Uncertainty*”, Maggio, 1999.
- [33] Prof. G. Bucci, Appunti dal corso “*Strumentazione elettronica*”, Università degli Studi di L’Aquila, Facoltà di Ingegneria, 2004.
- [34] S. Petrizzelli, “*Appunti di misure Elettriche*”, 2000.
- [35] E. Amico di Meane, M. Plassa, “*Riferibilità delle misure*”, Convegno su “L’accreditamento dei laboratori per la sicurezza alimentare”, Roma, 25-26 Ottobre 2005.
- [36] A. I. Shlyakhter, “*An improved framework for uncertainty analysis: accounting for unsuspected errors*”, ASTM Handbook, Risk Analysis, Vol. 14 No. 4, 1994.
- [37] P. Billingsley, “*Probability and measure*”, 2nd edition, John Wiley&Sons, New York, 1986.
- [38] Prof. L. Mezzalana, F. Salice, “*Tecniche di interfacciamento con segnali analogici*”, appunti dal corso di Informatica Industriale, 2005.
- [39] Prof. G. d’Agostini, “*Le basi del metodo sperimentale - un’introduzione pratica*”, Dipartimento di Fisica, università “La Sapienza”, Roma, 1 Febbraio 2001.
- [40] J.X. Wang, “*What every engineer should know about decision under uncertainty*”, Ed. M. Dekker, U.S.A., 2002.
- [41] V. Kreinovich, C. Quintana, L. Reznik, “*Gaussian membership functions are most adequate in representing uncertainty in measurements*”, abstract, 2004.
- [42] R.G. Hills, T.G. Trucano, “*Statistical validation of engineering and scientific models : background*”, U.S.A., Maggio 1999.
- Prof. S. Pisa, appunti dal corso di “*Misura e incertezza di misura*”, corso di Misure Elettriche I modulo, Università Roma 1, Roma , 7/3/2006.

- [43] G. Malaspina, F. Menafro, F. Petrillo, “*Certificazione di sensori e catene di misura forza con regressione polinomiale*”abstract, AIAS XXXI Convegno Nazionale, Parma ,18-21 Settembre 2002.
- [44] J.G.Webster, “*Measurement, Instrumentation and sensors handbook*”, CRC netbase, 1999.
- [45] J.V.Nicholas, D.R.White, “*Uncertainty in measurement*” John Wiley&Sons, U.S.A. 2001.
- [46] C. Secchi, appunti su “*Sensori e trasduttori*”, Ingegneria e tecnologie dei sistemi di controllo, 2005-2006.
- [46] Comincioli, V.:”Analisi numerica-Metodi e applicazioni”, McGraw Hill, Pavia, 1990.
- [47] Angrisani,L.: “*Uso della trasformata unscented per la valutazione dell’incertezza di misura*”, DIS, Dipartimento di Informatica e Sistemistica, Università di Napoli Federico II, Napoli, 2006.
- [48] Mat Buckland, “AI Techniques for game programming”, Premier Press
- [49] Zbigniew Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Springer
- [50] Beatrice Lazzarini, “Introduzione agli algoritmi genetici”, Dipartimento Ingegneria dell’Informazione Pisa
- [51] Koza, J. “Genetic programming: on the programming of the computers by means of natural selection”, 1992, MIT.

LINKS:

- www.rever.nl
- www.sit-italia.it
- www.sinal.it
- www.metrologia-legale.it
- www.oiml.org
- www.sincert.it
- www.nist.gov
- www.interfaceforce.com
- www.lebow.com
- www.feanor.com
- www.boch.net

- www.dekker.com
- www.mckinseyquarterly.com
- www.eilon-engineering.com
- www.hbm.com
- www.sensotec.com
- www.electronickits.com
- www.physics.smu.edu
- www.electronics-lab.com
- www.npl.co.uk
- www.maxim-ic.com
- www.instron.com
- www.borsanalisi.it/less18.shtml
- http://it.geocities.com/antonio_di_stefano/Informatica/algogene.html
- www.cs.unibo.it/~casadei/IA-82-algoritmi-genetici.htm